



**Escola Tècnica Superior d'Enginyeries
Industrial i Aeronàutica de Terrassa**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TITULACIÓ:

GRAU D'ENGINYERIA EN TECNOLOGÍES INDUSTRIALS

ALUMNE:

IVÁN PÉREZ GARCÍA

TÍTOL TFG:

**ESTUDIO AERODINÁMICO DEL FLUJO
ALREDEDOR DE UN AHMED BODY MEDIANTE
OPENFOAM**

DIRECTOR DEL TFG:

JOSEP MARIA BERGADÀ GRANYÓ

CONVOCATÒRIA DE LLIURAMENT DEL TFG

MAIG 2016

CONTINGUT D'AQUEST VOLUM:

DOCUMENT 1.- MEMÒRIA I ANNEXES

[Escriuiu el text]

[Escriuiu el text]



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Tècnica Superior d'Enginyeries
Industrial i Aeronàutica de Terrassa

Trabajo Final de Grado - Grado de Ingeniería en Tecnologías
Industriales

Estudio Aerodinámico del Flujo alrededor de un Ahmed Body mediante OpenFOAM

Autor: Pérez García, Iván

Director: Bergadá Grañó, Josep M^a

Co-Director: Castilla Lopez, Roberto

29 de Abril de 2016

Índices

PORTADA

Índice general

ÍNDICES	3
ÍNDICE GENERAL	3
ÍNDICE DE FIGURAS	4
AGRADECIMIENTOS	7
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1 OBJETIVO	9
1.2 JUSTIFICACIÓN	9
1.3 ALCANCE	10
1.4 REQUERIMIENTOS	10
1.5 ESTADO DEL ARTE	12
1.6 PLANIFICACIÓN	13
2. TEORÍA	17
1.7 ECUACIONES GOBERNANTES DE LA MECÁNICA DE FLUIDOS	17
1.7.1 Ecuación de la conservación de la masa	17
1.7.2 Ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento	18
1.7.3 Ecuación de la conservación de la energía	18
1.7.4 Ecuación de estado	19
1.8 HIPÓTESIS DEL FLUIDO	19
1.9 INTRODUCCIÓN AL CFD	20
3. MALLADO	22
1.10 BLOCKMESH	22
1.10.1 Código blockMesh	22
1.10.2 Definición de la geometría	25
1.11 CONFIGURACIONES DE MALLA ESTUDIADAS	26
1.12 ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD DE LA MALLA	30
1.12.1 Parámetro Y^+	30
1.12.2 Parámetros de calidad de celda	32
1.13 MALLA DEFINITIVA	33
1.13.1 Clasificación según el refinado	35
1.13.2 Clasificación según el ángulo de inclinación	35

4. POSPROCESADO	36
5. RESULTADOS	40
1.15 RÉGIMEN ESTACIONARIO:	41
1.16 RÉGIMEN TRANSITORIO	46
1.17 OBSERVACIÓN DE LA CAPA LÍMITE	49
1.18 TABLA RESUMEN DE SIMULACIONES	52
1.19 COEFICIENTES Y FUERZAS	55
1.19.1 Coeficiente de resistencia	55
1.19.2 Coeficiente de sustentación	57
1.19.3 Fuerza de resistencia aerodinámica (Drag Force)	59
1.19.4 Fuerza de sustentación (Lift Force)	61
6. CONCLUSIONES	63
7. IMPACTO AMBIENTAL	64
1.20 ESCENARIO ACTUAL	64
1.21 GASES EMITIDOS	64
1.22 AHORRO DEL IMPACTO FUTURO	65
8. PRESUPUESTO	66
9. TRABAJOS FUTUROS	67
10. BIBLIOGRAFÍA	68
ANEXOS	70
A. CÓDIGO DE OPENFOAM	70
a. <i>blockMeshDict</i>	70
b. <i>GeometricConditions</i>	76
c. <i>GradingConditions</i> de la malla fina	77
d. <i>GradingConditions</i> de la malla gruesa	78
e. <i>FunctionObjects</i> en <i>ControlDict</i>	78
f. Script para monitorizar residuales de U_x y U_y	80
g. <i>Script Allresults</i>	80
B. MALLAS EMPLEADAS	82
a. Malla fina para flujo turbulento (v.3)	82
b. Malla fina para flujo Laminar (v.3)	82

Índice de figuras

FIGURA 1.1: VISTAS DEL AHMED BODY CON DIMENSIONES EN MM]	11
--	----

FIGURA 1.2: GRÁFICA REPRESENTATIVA DE LA POTENCIA REQUERIDA VERSUS LA VELOCIDAD DEL VEHÍCULO RICHARD M. WOOD [2].....	13
FIGURA 1.3: DIAGRAMA JERÁRQUICO DE ACTIVIDADES EL TFG	14
FIGURA 3.1: SUBDICIONARIOS PRINCIPALES EN BLOCKMESHDict.....	23
FIGURA 3.2: ARCHIVOS DE MALLADO CON BLOCKMESH EN SU ÁRBOL DE CARPETAS.....	24
FIGURA 3.3: PERSPECTIVA DE LA MALLA Y SUS CONTORNOS.....	25
FIGURA 3.4: DETALLE DE BLOQUES DE LA MALLA DEFINITIVA.....	26
FIGURA 3.5: DETALLE DE LA MALLA EN EL MORRO DEL AHMED.....	27
FIGURA 3.6: DETALLE DE LA MALLA V.1. EN LA COLA DEL AHMED	28
FIGURA 3.7: DETALLE DE LA MALLA V.2. EN LA COLA DEL AHMED	29
FIGURA 3.8: DETALLE DE LA MALLA V.3 EN LA COLA DEL AHMED	29
FIGURA 3.9: DETALLE DE LA MALLA V.4 EN LA COLA DEL AHMED	30
FIGURA 3.10: DETALLE DE LA MALLA V.4 EN LA COLA DEL AHMED	30
FIGURA 3.11: Y+ DE LA MALLA V3 PARA $Re=3E06$	32
FIGURA 3.12: PARÁMETROS DE CALIDAD DE CELDA.....	33
FIGURA 3.13: VISTA COMPLETA DE LA MALLA V.3	34
FIGURA 3.14: DETALLE DEL AHMED BODY DE LA MALLA V.3.....	34
FIGURA 3.15: DETALLE DEL PLANO INCLINADO DE 35° EN LA MALLA V.3.....	34
FIGURA 4.1: DETALLE DE SUMARIO DE DATOS DEL SCRIPT <i>ALLRESULTS</i>	38
FIGURA 4.2: RESIDUALES EN FUNCIÓN DEL TIEMPO	38
FIGURA 4.3: Y+ EN FUNCIÓN DEL TIEMPO	38
FIGURA 4.4: COEFICIENTES C_p , C_d Y C_l EN FUNCIÓN DEL TIEMPO	39
FIGURA 4.5: FUERZAS DE RESISTENCIA, SUSTENTACIÓN Y MOMENTO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO.....	39
FIGURA 5.1: COEFICIENTE DE RESISTENCIA PARA TODOS LOS CASOS.....	55
FIGURA 5.2: DETALLE DE COEFICIENTE DE RESISTENCIA PARA RÉGIMEN TURBULENTO	56
FIGURA 5.3: DETALLE DE COEFICIENTE DE RESISTENCIA PARA RÉGIMEN LAMINAR	56
FIGURA 5.4: DETALLE DEL COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN PARA TODOS LOS CASOS.....	57
FIGURA 5.5: DETALLE DEL COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN PARA RÉGIMEN TURBULENTO	57
FIGURA 5.6: DETALLE DEL COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN PARA RÉGIMEN LAMINAR	58
FIGURA 5.7: DETALLE DE LA FUERZA DE RESISTENCIA PARA TODOS LOS CASOS	59
FIGURA 5.8: DETALLE DE LA FUERZA DE RESISTENCIA PARA REGIMEN TURBULENTO.....	59
FIGURA 5.9: DETALLE DE LA FUERZA DE RESISTENCIA PARA RÉGIMEN LAMINAR	60
FIGURA 5.10: DETALLE DE LA FUERZA DE SUSTENTACION PARA TODOS LOS CASOS.....	61
FIGURA 5.11: DETALLE DE LA FUERZA DE SUSTENTACIÓN PARA RÉGIMEN TURBULENTO	61
FIGURA 5.12: DETALLE DE LA FUERZA DE SUSTENTACIÓN PARA RÉGIMEN LAMINAR	62

Índice de tablas

TABLA 1.1: TABLA DE ACTIVIDADES DEL TFG	15
TABLA 3.1: FASES DE DESARROLLO DE LAS DIFERENTES VERSIONES DE MALLA	27
TABLA 3.2: TABLA RESUMEN DE MALLAS V3	35
TABLA 5.1: RESUMEN DE SIMULACIONES PARA LOS CASOS CON ÁNGULOS DE 15º, 25º Y 35º.....	40
TABLA 5.2: RELACIÓN ENTRE EL REYNOLDS Y EL GROSOR DE CAPA LÍMITE	52
TABLA 5.3: TABLA GLOBAL DE SIMULACIONES	54
TABLA 0.1: PRESUPUESTO GENERAL DEL PROYECTO	2

Agradecimientos

Primero de todo quiero agradecer a mi familia el apoyo mostrado todo este tiempo, teniendo en cuenta las numerosas dificultades encontradas. En especial mencionar a mis padres, y a mi pareja, Verónica, pues sin ellos éste habría sido un camino mucho más difícil de enfrentar.

Agradecer sobre todo a mi tutor de proyecto, Josep Maria Bergadà Granyó, que desde el primer momento, ha puesto toda su atención aportando tanto sus conocimientos como los recursos materiales que estaban a su disposición. Mencionar también la paciencia mostrada, el apoyo y el crecimiento personal transmitido. Él fue quien nos impartió la asignatura de mecánica de fluidos, primer contacto en el grado, y nos transmitió su pasión por este apasionante mundo.

Por último agradecer todas aquellas personas que de forma desinteresada han aportado, directa o indirectamente, su granito de arena para la realización de este proyecto.

Parte I

Memoria

1. Introducción

1.1 Objetivo

El objetivo final de este estudio es el de analizar el flujo aerodinámico en 2D alrededor de un Ahmed Body y sus efectos en los coeficientes para diferentes ángulos de inclinación en la parte trasera. Todo ello mediante la técnica del CFD (Computational Fluid Dynamics) a través de un paquete de librerías y herramientas informáticas “open source” denominado OpenFOAM.

No obstante, de forma paralela al caso estudiado, se pretende detallar los métodos utilizados con el objetivo de servir de breve introducción a la técnica del CFD y el uso concreto de herramientas del paquete OpenFOAM (OF de ahora en adelante).

1.2 Justificación

La aerodinámica como objeto de estudio se desarrolló con la aparición de la aviación, los conflictos bélicos y la carrera aeroespacial fue lo que principalmente empujó esta ciencia. Posteriormente pasó a tomar relevancia en aplicaciones civiles como es la industria del automóvil, la eficiencia y las políticas medio ambientales han sido también un factor que ha empujado a seguir investigando. La mejora de la aerodinámica tiene una influencia directa en el consumo de combustible. Además la eficiencia es un tema que preocupa comúnmente al consumidor, eso y el marco competitivo existente en el ámbito de la automoción ha llevado al estudio más detallado de la aerodinámica. El uso de modelos simplificados como el Ahmed body era muy común hace 30 o 40 años ya que no existía la potencia de cálculo actual. Eran modelos simples que podían llevarse al túnel de viento con el objetivo de categorizar lo que sucedía en la estela de un vehículo. Actualmente la mayoría de marcas prueban modelos CAD de sus vehículos perfectamente detallados y muchos de sus modelos ya ni si quiera son llevados al túnel de viento, sino que son simulados mediante CFD

Pero el verdadero salto está empezando ahora con la proliferación de las técnicas CFD en la simulación de multitud de sistemas químicos, de combustión, hidráulica, centrales de energía, etc.

Todo lo mencionado, sumado al interés por el sector de la automoción, el interés en conocer mejor ésta técnica y asimilar los conocimientos sobre fluidos

adquiridos durante el grado, ha llevado al estudio de un caso de Ahmed Body para diferentes ángulos de inclinación. Similar al estudio realizado por Ahmed, 1984 [1].

1.3 Alcance

El alcance de dicho proyecto ahonda en varias etapas:

- Asentamiento de los conocimientos adquiridos durante la carrera en el campo de la mecánica de fluidos.
- Aprendizaje de la teoría de las técnicas CFD orientadas al uso del paquete de software libre OpenFOAM.
- Ejecución de las técnicas CFD en todas sus etapas
 - o Interpretación física del problema
 - o Crear una malla de calidad donde trabajar para la obtención de resultados fiables.
 - o Configurar distintos ángulos de inclinación para la malla.
 - o Establecer condiciones de contorno adecuadas
 - o Realizar la computación y controlarla
 - o Posprocesado de los datos obtenidos incorporando pequeños programas desarrollados por el autor para la extracción automática de datos.
- Conocer cómo se comporta el fluido, e interpretar los resultados obtenidos posteriormente ser contrastados con otras fuentes.

No obstante, inicialmente el proyecto tenía como última etapa terminar implementando alguna técnica de Active Flow Control y ver su influencia en la reducción de la resistencia aerodinámica, pero debido a la complejidad del uso del software y la falta de tiempo, éste quedó fuera del alcance.

1.4 Requerimientos

La logística necesaria para llevar a cabo las simulaciones:

- PC con instalación de Linux
- PC con instalación de OpenFOAM
- PC portátil con procesador Intel Core i7 3610QM

- Adicionalmente se ha usado un clúster con acceso a 10 núcleos de 1.6GHz

La geometría utilizada para el caso se basa en las dimensiones del Ahmed Body original, con variación de tres ángulos de inclinación:

- Alpha = 15°
- Alpha = 25°
- Alpha = 35°

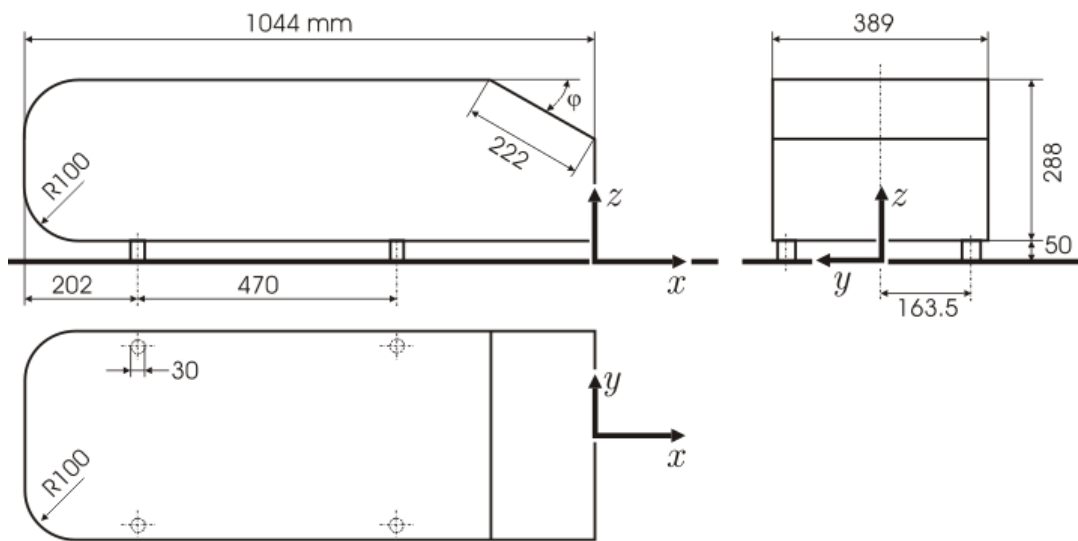


Figura 1.1: Vistas del Ahmed Body con dimensiones en mm]

:

Los parámetros del medio usado:

- Fluido: Aire a Mach < 0,3
- Sin transferencia de calor
- Viscosidad cinemática: $\nu_{aire} = 1.5 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$
- Reynolds, longitud característica $L = 1044 \text{ mm}$

Herramientas CFD:

- Malla: estructurada (blockMesh)
- Resolución
 - Laminar: algoritmo ICO
 - Turbulento: algoritmo PIMPLE, en PISO mode
 - Modelo de turbulencia: K-OmegaSST
- Posprocesado:
 - Visualizador: ParaView
 - Graficador: Gnuplot

1.5 Estado del arte

La dinámica de fluidos computacional, consistente en la resolución y el análisis de problemas relacionados con el flujo de fluidos mediante el uso de tecnología computacional, tiene su comienzo en los años 60, cuando se reducía al ámbito académico y su visibilidad fuera de éste era prácticamente nula. Sin embargo, en las últimas décadas ha experimentado una gran evolución hasta convertirse en una de las herramientas industriales más importantes para el diseño y análisis de dispositivos de ingeniería. Las causas principales de esta rápida evolución se deben, al aumento de la potencia y el abaratamiento de los recursos computacionales. Por otra parte, al desarrollo de algoritmos numéricos para resolver de manera eficiente los problemas que se plantean en el contexto de la ingeniería también han sufrido notables mejoras. Esto ha promovido la aparición de aplicaciones comerciales como FLUENT, CFX, OpenFOAM entre otros.

Actualmente la aerodinámica de los coches ha mejorado mucho respecto hace 40 años gracias a los descubrimientos que han permitido estudios aerodinámicos como el que realizó Ahmed en 1984 [3]. En aquel momento no existía la potencia de cálculo de los ordenadores actuales y los experimentos se realizaban en túneles de viento. Siendo costosa y más lenta la puesta en escena de diferentes casos.

Se sabe por ejemplo que el uso de mejoras aerodinámicas en la superficie de un vehículo es capaz de disminuir hasta en un 70% del drag, Richad M.Wood Et. al [2]. Si tenemos en cuenta que a 100km/h el drag representa el 50% de todas las fuerzas resistentes de un vehículo, es claro atribuir que repercute notablemente en la reducción del consumo de combustible

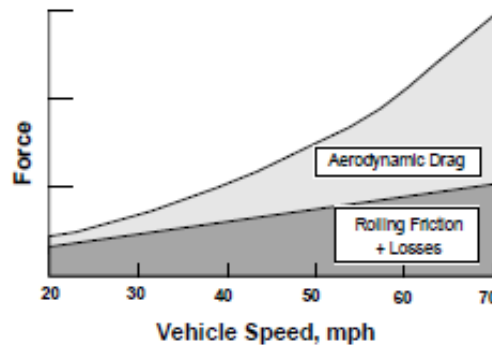


Figura 1.2: Gráfica representativa de la potencia requerida versus la velocidad del vehículo Richard M.Wood [2]

Actualmente existe mucha literatura y artículos científicos donde se categorizan los tipos de turbulencias que se originan en un vehículo y muchos otros que se dedican, una vez se conocen, a mitigarlos. Se ha comprobado, por ejemplo, la baja influencia que tiene la forma del morro en comparación con el efecto que produce la geometría trasera sobre el flujo de aire y la generación de bajas presiones en la estela.

El CFD se ha convertido hoy en día en la herramienta más extendida por su bajo coste y fácil puesta en marcha, pues no requiere de instalaciones especiales. Pero deben conocerse sus limitaciones, ya que los métodos numéricos que utiliza y la calidad de las mallas condiciona mucho el error de los resultados. Esto implica un conocimiento muy elevado de los métodos para aquellas industrias o personal que se dedica a la investigación o al uso profesional, de forma que puedan interpretar el resultado de forma correcta.

El método más efectivo, que no eficiente en tiempo y recursos, de conocer con fiabilidad el comportamiento de un fluido es experimentarlo físicamente. Pero en la mayoría de casos no será posible por su alto coste. Es ahí donde el CFD entra en juego como método viable a seguir.

1.6 Planificación

Identificación de las actividades que se llevan a cabo para la elaboración del proyecto final del grado, como se puede ver en el desglose del Figura 1.3 y en mayor detalle en la Tabla 1.1.

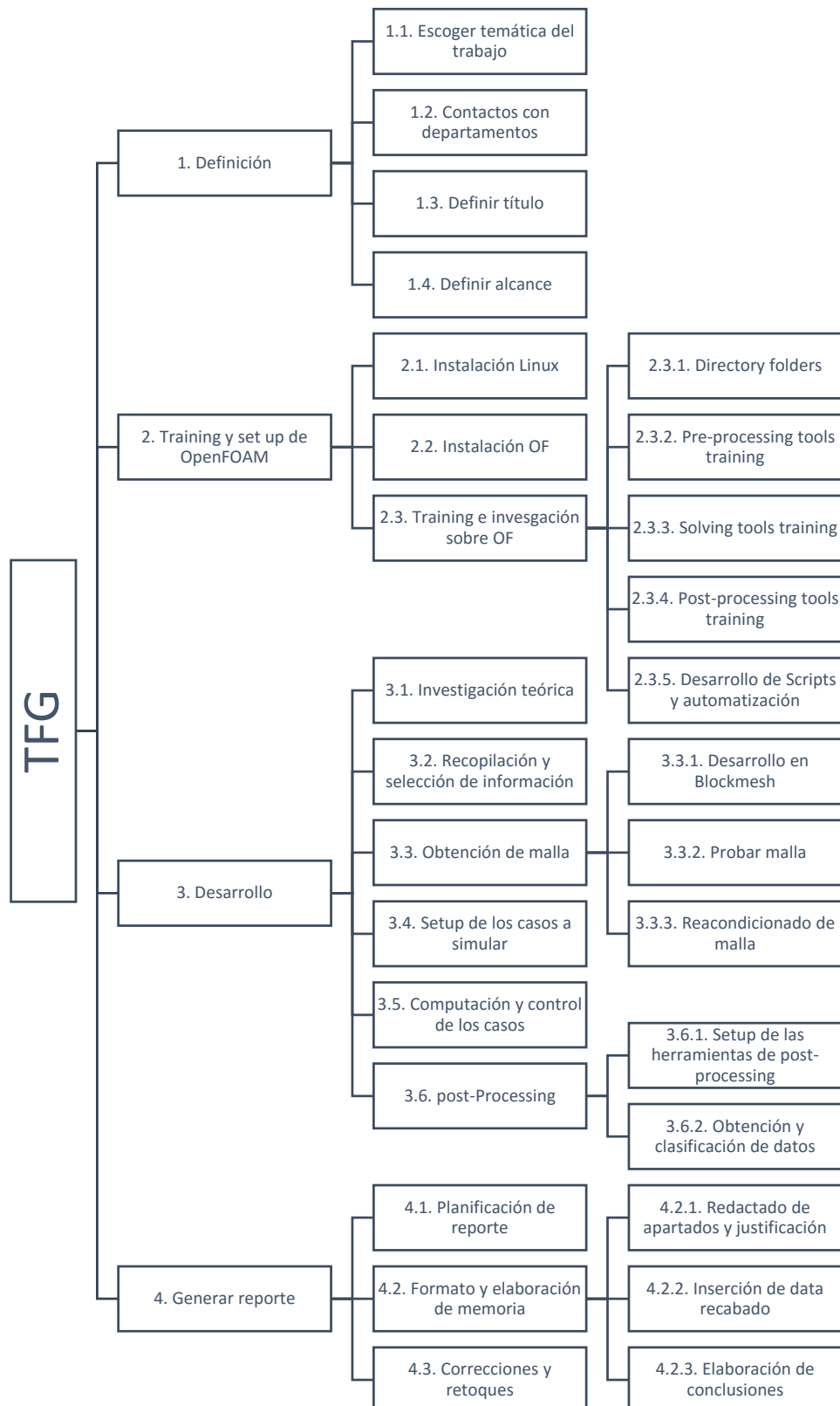


Figura 1.3: Diagrama jerárquico de actividades el TFG

Actividades	Horas	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR										
1. Definición																					
1.1. Escoger temática	5																				
1.2. Contactos con departamentos	5																				
1.3. Definir título	1																				
1.4. Definir alcance	2																				
2. Training y setup de OpenFOAM																					
2.1. Instalación Linux	10																				
2.2. Instalación OF	3																				
2.3.Training sobre OF	95																				
2.4.1. Directory folders setup	30																				
2.4.2. Pre-processing tools training	30																				
2.4.3. Solving tools training	30																				
2.4.4. Post-processing tools training	5																				
2.4.5. Desarrollo de Scripts y automatización	5																				
3. Desarrollo																					
3.1. Investigación teórica	10																				
3.2. Recopilación y selección de información	20																				
3.3. Obtención de malla	80																				
3.3.1. Desarrollo en Blockmesh	45																				
3.3.2. Probar malla	10																				
3.3.3. Corrección de malla	20																				
3.4. Setup de los casos a simular	10																				
3.5. Computación y control de los casos	10																				
3.6. post-Processing	10																				
3.6.1. Setup de las herramientas de post-processing	7																				
3.6.2. Obtención y clasificación de datos	20																				
4. Generar reporte																					
4.1. Planificación de reporte	5																				
4.2.Elaboración del reporte	50																				
4.2.1. Redactado de apartados y justificación	30																				
4.2.2. Inserción de data recabado	10																				
4.2.3. Elaboración de conclusiones	3																				
4.3. Correcciones y retoques	5																				

Tabla 1.1: Tabla de actividades del TFG

Como se puede observar el training con OpenFOAM (actividad 2.3) se ha extendido durante toda la fase de desarrollo del proyecto, pues se trata de una herramienta open-source extremadamente compleja, sin interfaz gráfica, con centenares de opciones y herramientas específicas por descubrir a medida que se avanza.

Se puede apreciar cierta discontinuidad y tardanza en el comienzo de las simulaciones debido al estancamiento con la versión 1 de la malla. La versión 1 no convergía ninguna simulación como se detalla más adelante en la Tabla 3.1. Éste periodo de bloqueo se alargó más de un mes debido a la inexperiencia y desconocimiento de la técnica del CFD, así como la forma de abordar los diversos tipos de problemas que pueden darse a la hora de converger la simulación.

Tanto el control de la simulación (actividad 3.5) como la obtención de resultado de múltiples simulaciones (actividad 3.6.2) requirió del desarrollo de scripts automáticos de obtención de datos y aprendizaje del software de graficado *gnuplot*.

2. Teoría

1.7 Ecuaciones gobernantes de la mecánica de fluidos

Las ecuaciones gobernantes para la mecánica de fluidos representan las leyes de conservación de la física tradicionales:

- La masa del fluido se conserva
- La razón de cambio de la cantidad de movimiento es igual a la suma de las fuerzas que actúan sobre el fluido (2ª ley de Newton)
- La razón de cambio de energía es igual a la suma del flujo de adición de calor y el grado de trabajo realizado sobre una partícula de fluido (1ª ley de la termodinámica)

El fluido será tratado como un medio continuo. Para el análisis de fluidos a escala macroscópica ($1\mu m$ o más) el tratamiento molecular de la materia puede ser ignorado. Se describe el comportamiento de un fluido en términos de propiedades macroscópicas, tales como, la velocidad, presión, densidad y temperatura, y sus derivadas temporales y espaciales. Pueden ser interpretadas como una media del cambio sobre un número grande de moléculas. Una partícula o punto en un fluido es entonces el elemento de fluido más pequeño posible para el cual sus propiedades macroscópicas no son influenciadas por moléculas individuales.

Se trata de un volumen diferencial con 6 caras (norte, sur, este, oeste, arriba y abajo) donde son aplicables las propiedades del fluido como constantes

1.7.1 Ecuación de la conservación de la masa

Ecuación de la continuidad de la masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot \mathbf{U}) = 0$$

Hipótesis de fluido incompresible tal que,

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0$$

Se obtiene

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0$$

1.7.2 Ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento

Ecuación de cantidad de movimiento en modo diferencial toma la forma:

La tasas de incremento de
momentum de una
partícula fluida = La suma de las fuerzas sobre la partícula
(superficiales + gravitatorias + rozamiento).

$$\rho \frac{D\mathbf{U}}{Dt} = -\nabla P + \rho \mathbf{g} + \nabla \cdot \bar{\tau}$$

También conocida como ecuación de Cauchy. Se trata de una ecuación totalmente irresoluble ya que se desconocen los esfuerzos viscosos [1].

Se ha optado por describir directamente la forma de Navier-Stokes para ecuación conservación de la cantidad de movimiento, aplicable a todo tipo de fluido

$$\rho \frac{D\mathbf{U}}{Dt} = -\nabla P + \rho \mathbf{g} + \mu \nabla^2 \mathbf{U} + \frac{1}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{U})$$

Siendo fluido incompresible y sin considerar ningún efecto gravitatorio la ecuación de N-S queda,

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{U} = \frac{-\nabla P}{\rho} + \nu \nabla^2 \mathbf{U}$$

1.7.3 Ecuación de la conservación de la energía

La energía de un fluido a menudo se considera como la suma de la energía interna (térmica), la energía cinética y la energía potencial (gravitacional). Todo ello se engloba dentro del término E.

Tasa de incremento de energía de una partícula de fluido	=	Tasa neta de calor añadido a la partícula de fluido	+	Rasa neta de trabajo realizado sobre la partícula de fluido
--	---	---	---	---

$$\frac{\rho DE}{Dt} = -\nabla \cdot (P \cdot \mathbf{U}) + \left[\frac{\partial \mathbf{U} \tau}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{U} \tau}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{U} \tau}{\partial z} \right] + \nabla \cdot (k \nabla (T)) + S_E$$

S_E = fuentes externas de energía. Por ejemplo la radiación solar o un proceso de combustión.

$\nabla \cdot (k \nabla(T))$: Es el término difusivo de la energía. Transmisión de energía a través de propagación estática por el material o fluido. Comúnmente también conocido como calor (Q).

$-\nabla \cdot (P \cdot \mathbf{U}) + \left[\frac{\partial u_\tau}{\partial x} + \frac{\partial u_\tau}{\partial y} + \frac{\partial u_\tau}{\partial z} \right]$: Representa el trabajo realizado por las fuerzas de superficie normal y tangencial, respectivamente. Por ejemplo. Un gas al expandirse y al hacer girar el rotor dentro de una turbina ideal sin transferencia de calor ni fuentes internas, sólo tendría éstos términos en la ecuación final.

1.7.4 Ecuación de estado

El movimiento de un fluido en tres dimensiones es descrito por un sistema de cinco ecuaciones diferenciales: conservación de la masa, momentum en x-y-z, y la ecuación de la energía. Entre las incógnitas se encuentran las variables termodinámicas ρ , p , h y T . Por tanto se necesita un punto de conexión entre éstas cuatro variables que se encuentran en distintas ecuaciones al mismo tiempo. Esta conexión se puede conseguir mediante la asunción de equilibrio termodinámico que brinda la ecuación de estado:

$$p = p(\rho, T) \quad \text{y} \quad h = h(T)$$

Para gases perfectos se escribe como:

$$p = \rho R T \quad \text{y} \quad h = C_v T$$

En fluido compresible la ecuación de estado hace de vínculo entre la ecuación de la energía por un lado y la ecuación de la conservación y la de momentum por otro.

Para líquidos y gases a baja velocidad se pueden considerar fluidos incompresibles. Sin variaciones de densidad no se requiere de ningún vínculo para conectar dichas ecuaciones. La ecuación de la energía puede resolverse de forma independiente.

1.8 Hipótesis del fluido

Con el objetivo de abordar un problema aerodinámico es necesario concretar algunas hipótesis para nuestro fluido:

- Fluido viscoso
- Ley de esfuerzos cortantes Newtoniana

- Densidad constante
- Fluido isotérmico
- 2 dimensiones, donde la dirección z toma derivada nula, $\frac{\partial}{\partial z} = 0$

Justificación para fluido incompresible:

Existe un valor adimensional número de Mach (M) que mide el módulo medio de la velocidad del fluido (bajo unas condiciones de presión y temperatura constantes) con respecto la velocidad del sonido en dichas condiciones del fluido. Donde Mach igual a 1 significa que la velocidad del fluido es exactamente la velocidad del sonido. Para un Mach determinado se obtiene información del fluido y una de las propiedades es la compresibilidad.

Para conocer nuestro Mach aproximado debemos tener presente que vamos a trabajar con aire en condiciones estándar a 15°C, una atmósfera de presión y una velocidad máxima no superior a 50 m/s.

Por lo que se puede considerar fluido incompresible al tratarse de régimen subsónico con $M < 0,3$ tal y como puede justificarse en, *Josep M Bergada* [1].

1.9 Introducción al CFD

Computational Fluid Dynamics o CFD es el análisis de sistemas que implican a los fluidos, la transferencia de calor y fenómenos asociados a reacciones químicas mediante simulaciones computacionales. Esta técnica es muy potente y alberga un amplio número de aplicaciones industriales y no industriales:

- Aerodinámica en aviones y vehículos: Lift y drag.
- Hidrodinámica de barcos
- Plantas de energía: combustión interna de motores y turbinas de gas.
- Turbomaquinaria
- Ambiente externo e interno en construcciones: Cargas del viento y climatización/ventilación.
- Meteorología: predicción meteorológica

Desde los años 60 en adelante la industria aeroespacial ha integrado el CFD a la fase de diseño, I+D y manufactura de los aviones y motores a reacción. Más recientemente el método ha sido aplicado al diseño interno de motores de combustión o cámara de combustión en turbina. Además, los fabricantes de la industria de la automoción actualmente ya predicen de forma rutinaria las fuerzas

de resistencia (drag forces), así como el ambiente interior del vehículo mediante CFD. Progresivamente el CFD se está convirtiendo en una fase vital del diseño en productos industriales y procesos.

El fin último del CFD es proveer de una capacidad comparable a otras herramientas CAE (computer aided engineering), como en los de análisis de estructuras. La razón por la cual el CFD ha tardado tanto en proliferarse, es la tremenda complejidad inherente en las ecuaciones gobernantes para poder modelar un fluido y que al mismo tiempo sea económico a nivel de tiempo y suficientemente preciso. La disponibilidad de asequibles equipos informáticos de alto rendimiento ha llevado a un reciente aumento en su interés, y el CFD ha entrado definitivamente en el ámbito industrial desde los 90'.

3. Mallado

Entre los múltiples malladores que se pueden encontrar específicamente para OpenFOAM, existen dos ramas principales: los generadores de malla estructurada por bloques (como blockMesh) y los generadores de malla por barrido desde un punto inicial (como snappyHexMesh). Los últimos son ideales para generar mallas en geometrías complejas, pero su correcto uso requiere de mucha experiencia si se pretende obtener una malla de calidad.

Por este motivo se ha optado por el uso de BlockMesh como mallador, ya que nuestra geometría 2D es relativamente sencilla y vamos a tener mucho control sobre la malla más adelante.

En general, el propósito del mallador es generar los archivos contenidos en constant/polyMesh que constan de 5 diccionarios: points, owner, neighbour, faces y boundary.

1.10 BlockMesh

BlockMesh genera bloques estructurados de hexaedros que luego serán convertidos a un formato desestructurado de OpenFOAM. El diccionario ubicado en /system/blockMeshDict contiene toda la programación de la malla. El esfuerzo invertido en generar dicho código incrementa exponencialmente para geometrías rebuscadas y puede no compensar.

Este modo de programación de malla evita tener que modelar la geometría del cuerpo en un programa CAD, de forma que se ha programado directamente el negativo de éste. Es decir se genera directamente el espacio dónde se realiza el experimento.

1.10.1 Código blockMesh

La malla es programada en un diccionario llamado blockMeshDict dentro del directorio system. La lógica a seguir es la siguiente:

Sub diccionarios	Descripción
convertToMeters	Introduce el factor de conversión de unidades si no trabajamos en metros. En nuestro caso milímetros.
Vértices	Subdiccionario para la declaración de vértices o puntos mínimos necesarios para constituir la malla

Blocks	Se crean los bloques formados por los vértices declarados. P.e: un hexaedro conectará 8 vértices. El orden es importante y establece el sentido de extrusión de dichos bloques. Cada bloque tiene sus propias direcciones x_1 , x_2 , x_3 .
Edges	Declara todas aquellas aristas que no sean rectas. P.e. arcos. En la Figura 3.1 sería necesario declarar la arista 9 formada por los vórtices 5 y 1.
Boundary	Se usa para declarar las caras externas de aquellos bloques que delimitan el contorno del experimento. El orden es importante ya que establece la dirección normal al plano.
mergePatchPairs	Declara caras internas entre bloques si se desea. En nuestro caso no ha sido de utilidad.

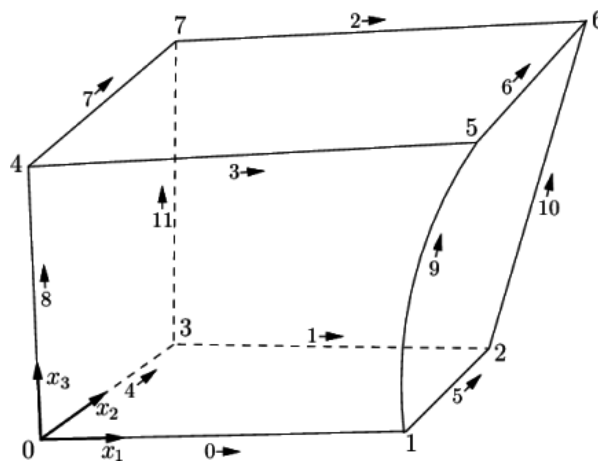


Figura 3.1: Subdiccionarios principales en blockMeshDict

Para una mayor comprensión del código se puede consultar [2].

Debido al alto consumo de tiempo que requiere generar una malla punto a punto y con el objetivo de poder tener diferentes ángulos de inclinación en el Ahmed Body, se ha implementado el uso de distancias y cotas parametrizadas. Esto ha facilitado mucho el trabajo, tanto a la hora de evitar errores durante la programación como en la capacidad de aplicar medidas correctoras para mejorar o adaptar la malla.

Los parámetros se han separado del diccionario principal para poder ser editados con mayor facilidad a la hora de perfeccionar la malla, como se muestra en la Figura 3.2.

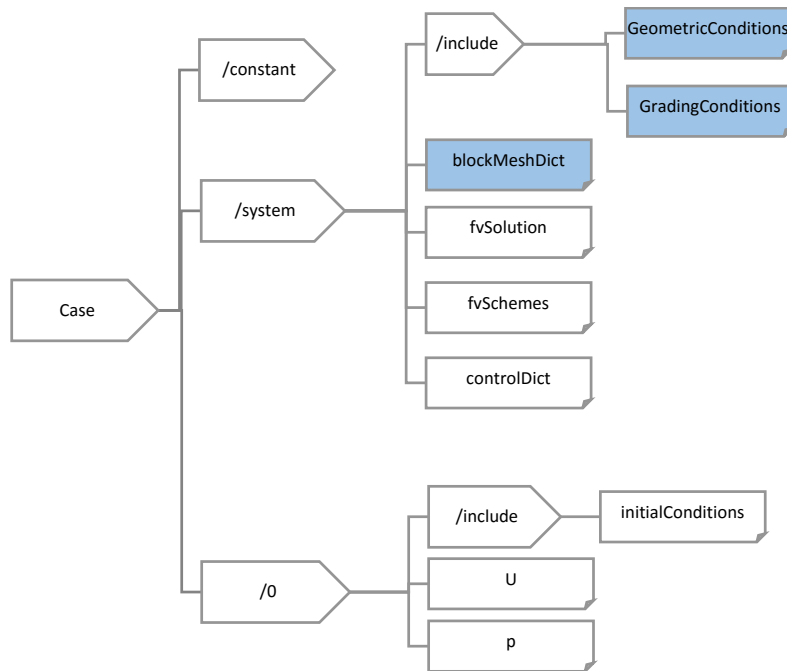


Figura 3.2: Archivos de mallado con blockMesh en su árbol de carpetas

- **blockMeshDict**: Es el diccionario principal que contiene el código de la estructura básica de la malla. Para una mayor compresión se ha incluido el código completo en el Apéndice a.

Debido a la complejidad y larga disposición del código se han separado en sub diccionarios los parámetros geométricos que son susceptibles de ser cambiados para variar nuestra malla. Por un lado los parámetros geométricos que modifican las dimensiones y por otro los parámetros que controlan el refinamiento. Se les ha llamado *GeometricConditions* y *GradingConditions* respectivamente. Éstos son llamados desde el *blockMeshDict* a través del directorio */include*.

- **GeometricConditions**: Contiene todas aquellas cotas y ángulos, geométricos básicos que son susceptibles de ser adaptados para reconfigurar la geometría de la malla, pero no la disposición entre los bloques (*blockMeshDict*).

Controla parámetros como la distancia entre el Ahmed y el suelo, el tamaño del dominio total de la malla, el ángulo de inclinación o el grosor del tamaño de bloque para la capa límite. Se puede observar en detalle en el apéndice A.b.

- **GradingConditions**: Contiene todas aquellas variables que modifican la resolución o número de celdas en cada bloque, así como el *grading* entre celdas dentro de un mismo bloque.

Al disponer de dos mallas distintas: una fina y una gruesa, tendremos dos posibles configuraciones. Se pueden observar en detalle en el apéndice A.c. y A.d, respectivamente..

1.10.2 Definición de la geometría

Gracias al conocimiento adquirido sobre el mallador blockMesh se han podido diseñar los bloques según sus limitaciones. Por ello se hace inevitable recurrir a bloques de hexaedros con caras de cuatro aristas si queremos obtener baja oblicuidad en la división de éstos en celdas. Es importante recordar que a mayor calidad de las celdas (baja oblicuidad, relación de aspecto cercana a 1, etc), la simulación tendrá muchas más posibilidades de converger, dar resultados reales e incluso disminuir el tiempo de computación.

La siguiente figura muestra el diseño base de los bloques sin celdas. Cabe mencionar que si la altura del Ahmed es H se ha mantenido una distancia frontal al *inlet* de $10H$ y la distancia dorsal hacia la salida u *outlet* se ha mantenido en $20H$.

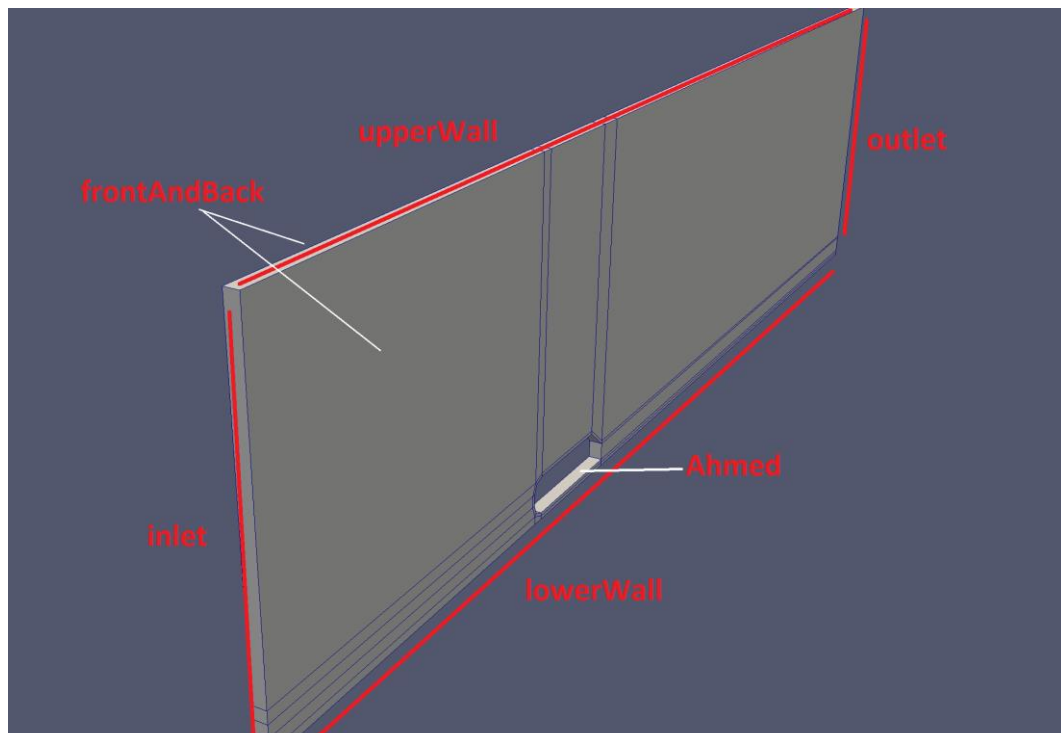


Figura 3.3: Perspectiva de la malla y sus contornos

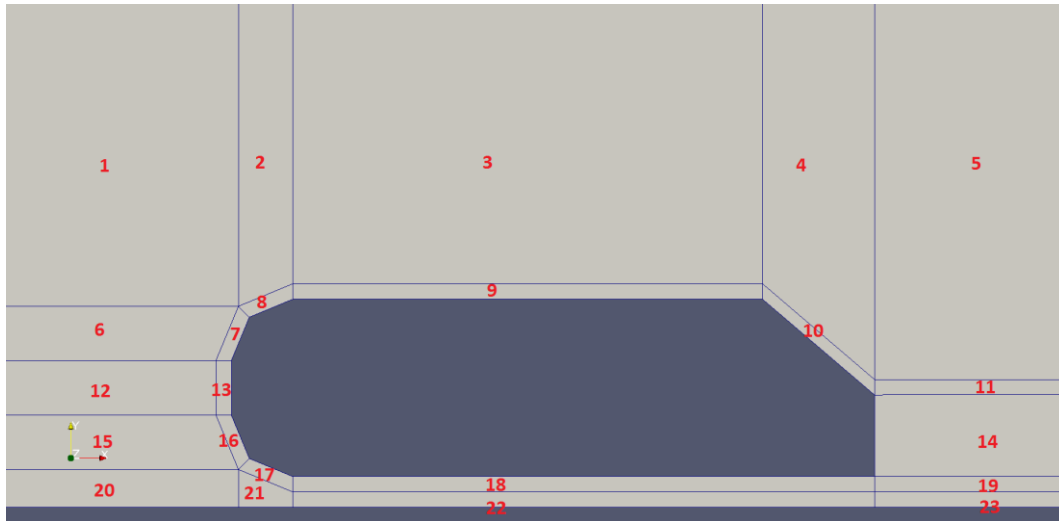


Figura 3.4: Detalle de bloques de la malla definitiva

En total el diseño final consta de 23 bloques y cada bloque consta de 8 vértices, 4 para el plano z superior y otros 4 para el plano z posterior. Todo ello queda especificado punto a punto en el código del `blockMeshDict`

1.11 Configuraciones de malla estudiadas

A continuación se describe el proceso de mejora y configuraciones de diferentes mallas en las siguientes fases:

	Fases	Versión	Características	Problemas
1º	Malla inicial, versión 1	1	Muy adaptada a la geometría.	No converge
2º	Construcción de nuevas mallas	2, 3, 4	Bloques más rectangulares Menos aristas inclinadas al flujo entre bloques.	v.2: la más irregular v.4: según las condiciones no converger
3º	Ajuste de la versión 3	3.5 3.7 3.8	Incremento del número de celdas e implementación de <i>grading</i> .	
4º	Variación de ángulos de inclinación	3.8 3.5	Ángulos de 15°, 25°, 35°, 45°.	Ángulo de 45° puede no converger

Tabla 3.1: Fases de desarrollo de las diferentes versiones de malla

Se ha detectado que la divergencia siempre venía ocasionada por aquellas celdas situadas en el cambio de inclinación del chaflán trasero. La forma que tienen y la disposición entre bloques respecto al flujo parece ser el factor determinante. Por ello las diferentes versiones se han centrado en cambiar la disposición de bloques en el plano inclinado en la cola del Ahmed.

Nótese que la justificación verdadera reside en los métodos numéricos usados por el software CFD a la hora de transformar el dominio físico a dominio computacional para aplicarlos. La comprensión de dichos métodos está fuera del alcance de este proyecto.

Los bloques en el morro de la Figura 3.5 se han mantenido con la misma estructura en todas las versiones de la malla.

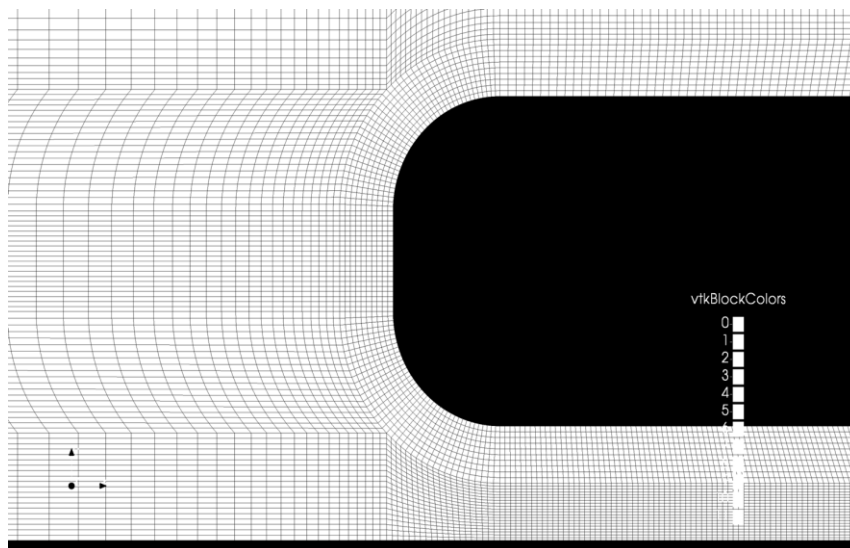


Figura 3.5: Detalle de la malla en el morro del Ahmed

A continuación se muestran las diferentes versiones de la disposición de bloques en la cola del Ahmed.

- Versión 1:
La siguiente figura muestra el detalle de las celdas críticas

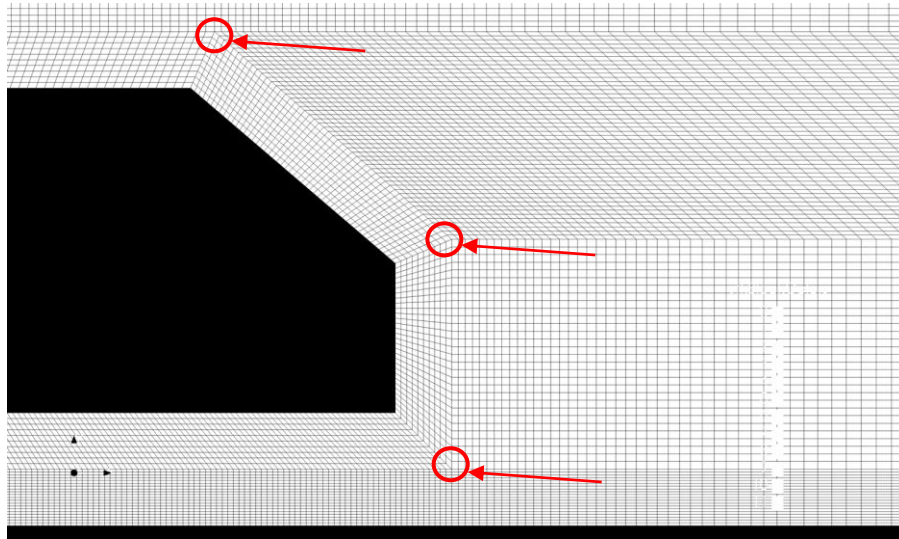


Figura 3.6: Detalle de la malla v.1. en la cola del Ahmed

Éste punto produjo un gran consumo de tiempo, pues dada la inexperiencia en el CFD, se observó prematuramente que tras el esfuerzo invertido en la programación de la malla, ésta no era capaz de dar resultados.

Se probaron:

- Celdas más gruesas
- TimeSteps muy bajos
- Diferentes fluidos
- Diferentes velocidades
- Diferentes modelos de turbulencia
- Diferentes solvers incompresibles (laminar y turbulento)

Tras muchos intentos y consultas se optó por modificar los bloques en el chaflán trasero. Lo que implicó una revisión completa del código de mallado, con el objetivo de aprovecharlo al máximo y modificar sólo las partes necesarias.

- Versión 2:

Ésta es la versión más sencilla de las tres modificaciones y se puede observar que para ganar resolución en la estela del flujo hay que incrementar excesivamente el número de divisiones en la capa límite con lo que no se tiene un buen control de la malla como se observa en la Figura 3.7.

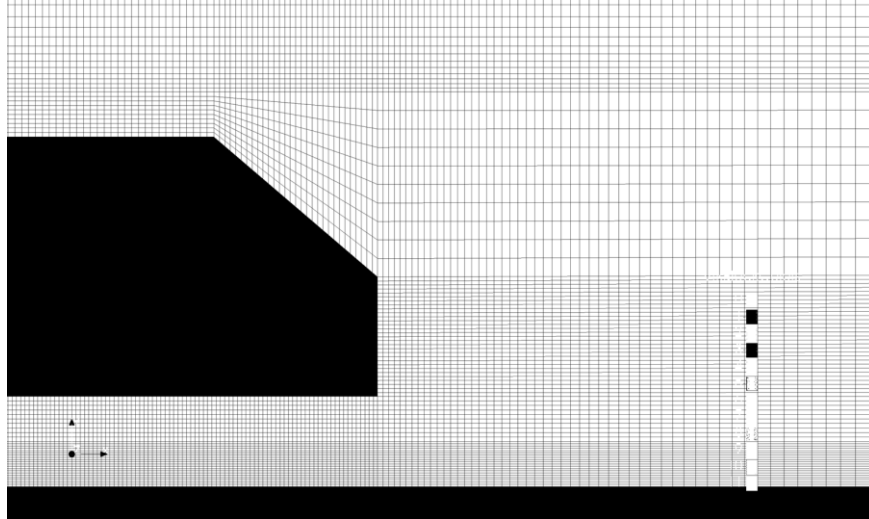


Figura 3.7: Detalle de la malla v.2. en la cola del Ahmed

- Versión 3:
Con la evolución de la v.2, tenemos la versión 3. Esta vez se han implementado nuevos bloques para controlar mejor el *grading* en la capa límite y en la estela de forma independiente.

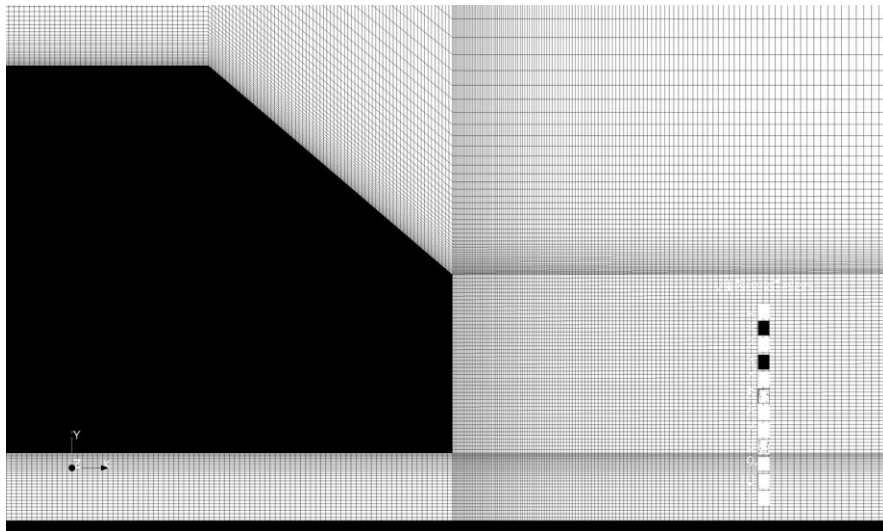


Figura 3.8: Detalle de la malla v.3 en la cola del Ahmed

- Versión 4:
Después de crear la malla v.2 y ver sus limitaciones se optó inmediatamente por esta estrategia por su rápida implementación en lugar de seguir el curso natural hacia la implementación de malla v.3. De esta

manera se podrá comparar el máximo número de tipos de malla aplicables a este caso y así decidir cual se ajusta mejor a la convergencia.

Tras varias pruebas en diferentes simulaciones se elige la malla v.3 como la malla

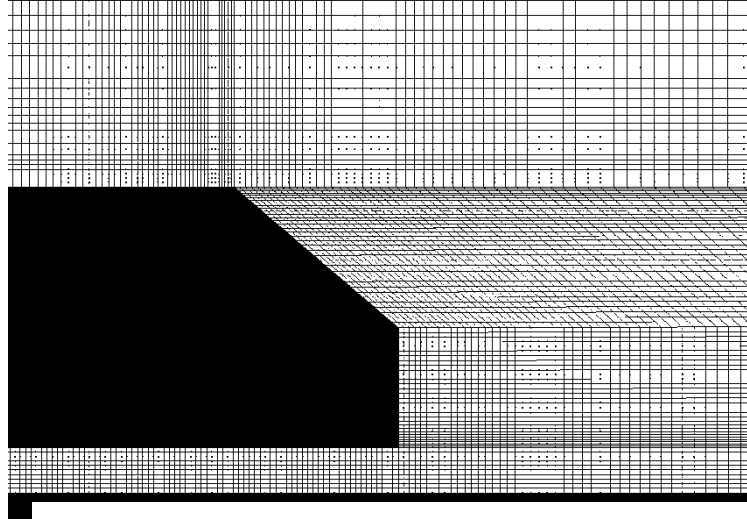


Figura 3.10: Detalle de la malla v.4 en la cola del Ahmed

Figura 3.9: Detalle de la malla v.4 en la cola del Ahmed

más estable.

El siguiente paso es aumentar la resolución, especialmente en la capa límite. Esto proporcionará resultados más fiables en las simulaciones.

1.12 Aseguramiento de la calidad de la malla

La importancia de una buena malla es algo básico para obtener resultados reales o con el mínimo error posible. Esto significa que habrá que poner más celdas allí donde los gradientes sean más altos. Esto implica reforzar mucho la densidad de celdas en la capa límite ya que el gradiente de velocidades perpendicular a la superficie va a ser muy elevado ($\frac{\partial U_x}{\partial y} \gg 0$).

Otro aspecto a tener en cuenta es que se ha usado una malla estructurada, que requiere normalmente menos tiempo de convergencia y los algoritmos son más eficientes.

1.12.1 Parámetro Y^+

El y^+ es un parámetro adimensional. Se usa para averiguar como de gruesa o fina es una malla para el caso estudiado. Es especialmente importante con modelos de turbulencia para determinar el tamaño apropiado de la celda adyacente a cualquier cara o contorno establecido como tipo pared, (*wall*) con *non-slip condition*, o condiciones de no deslizamiento. Esto implica que consideramos fluido viscoso.

Los modelos de turbulencia, para aproximar la capa límite, usan *wall functions* (funciones de pared) y son aplicados sólo a la celda adyacente a la pared. De ésta manera se puede abordar con los medio actuales una pseudo capa límite aproximada sin la necesidad de aumentar de manera exagerada la densidad de la malla. De ahí la importancia del grosor de dicha celda. Para una correcta predicción se recomienda:

- Altos Reynolds con modelos RANS o LES: $30 < y^+ < 200$
- Bajos Reynolds con: $y^+ \approx 1$

$$y^+ = \frac{U_* \cdot \Delta y}{\nu}$$

Velocidad de fricción de pared: $U_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = |U_\infty| \sqrt{\frac{C_f}{2}}$

Coeficiente de fricción: $\frac{C_f}{2} = 0.0359 \cdot Re^{-0.2}$

Altura de celda: $\Delta y = \frac{\nu \cdot y^+}{U_*}$

El caso más extremo de la simulación será para el Reynolds más alto:

$$Re = 3 \cdot 10^6; \quad |U| = 43.1 \text{ m/s} ; \quad \nu_{aire} = 1.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

Si buscamos un $y^+ = 125$,

Obtenemos un tamaño de altura de celda de aproximadamente $\Delta y \approx 1,02 \text{ mm}$

De esta forma se ha desarrollado un degradado de la malla en base a 1 mm de altura para la celda adyacente. Para comprobarlo hemos utilizado la herramienta

```
>> yPlus -latestTime
```

```
>> patchAverage -latestTime yPlus Ahmed > log.latestYplus
```

Obteniendo:

```
y+ : min: 1.25803
```

max: 414.964

average: 126.359

El yplus máximo es debido al morro del Ahmed donde el fluido se acelera al ser tener que reseguir el perfil del Ahmed Body.

Se conoce, según Ahmed [3], que el porcentaje de la resistencia por fricción es tan sólo del 15% sobre el total, por lo que se espera poca influencia del alto yplus en el recodo del cuerpo. No así como en la superficie plana paralela al flujo que tanto en la parte superior como inferior del Ahmed donde sí se respetan los valores, como se puede ver en la Figura 3.11.

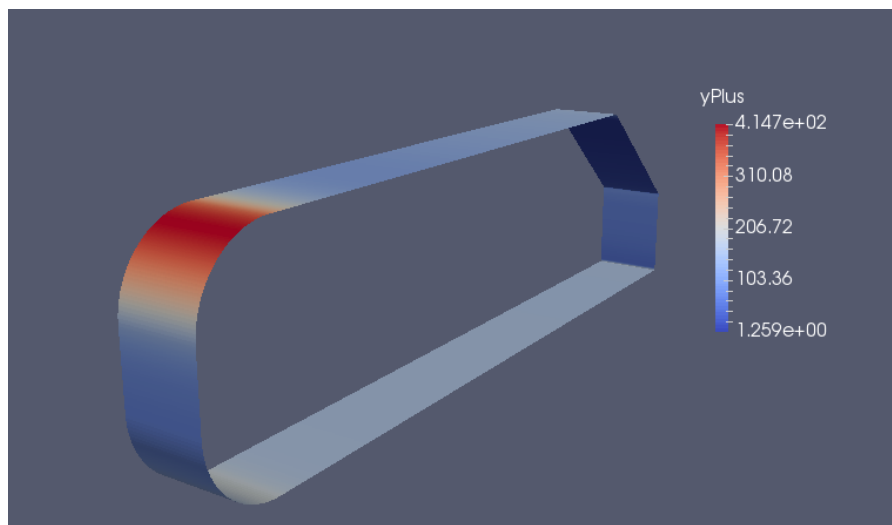


Figura 3.11: Y+ de la malla v3 para Re=3e06

1.12.2 Parámetros de calidad de celda

La herramienta checkMesh de OpenFOAM también permite analizar otros parámetros básicos de calidad de la malla que afectan directamente a la estabilidad.:

Parámetro	Valor deseado	Descripción	Problemas
No-ortogonalidad	$\theta < 50^\circ$	Angulo formado entre el vector que une los centros de dos celdas adyacentes y el vector normal de la cara coincidente.	Afecta a la estabilidad y sobre todo a la precisión.
Oblicuidad	0-1	Distancia proyectada más próxima que une el vector que une los centros de dos celdas adyacentes y el	Valores altos causan inestabilidad. Normalmente es sinónimo

		centro de las caras coincidentes.	de alta relación de aspecto.
Relación de aspecto	1	Mide lo cuadrada que es una celda.	Valores altos dificultan la resolución de la matriz, de calcular la presión.o predecir remolinos en LES

Figura 3.12: Parámetros de calidad de celda

Se detalla en mayor profundidad en *Advanced Training* [4]

Tras ejecutar la herramienta checkMesh obtenemos los siguientes resultados:

```
>> checkMesh
```

Obteniendo:

```
Max aspect ratio = 165.877 OK.
```

```
Mesh non-orthogonality Max: 43.8489 average: 9.33016
```

```
Non-orthogonality check OK.
```

```
Max skewness = 0.919092 OK.
```

Se ha obtenido un aspect ratio máximo alto, por las celdas situadas en puntos de la malla donde sabemos la dirección principal de la velocidad del fluido y que sus gradientes serán muy bajos, es decir, en puntos situados a medida que nos alejamos del Ahmed Body. Por lo tanto no se espera ninguna influencia en los resultados, excepto un menor tiempo de computación al reducir celdas allí donde no se necesitan.

1.13 Malla definitiva

En las siguientes figuras puede verse detallado la fase final de la malla para altos Reynolds. La configuración de los parámetros de GradingConditions puede verse detallada en

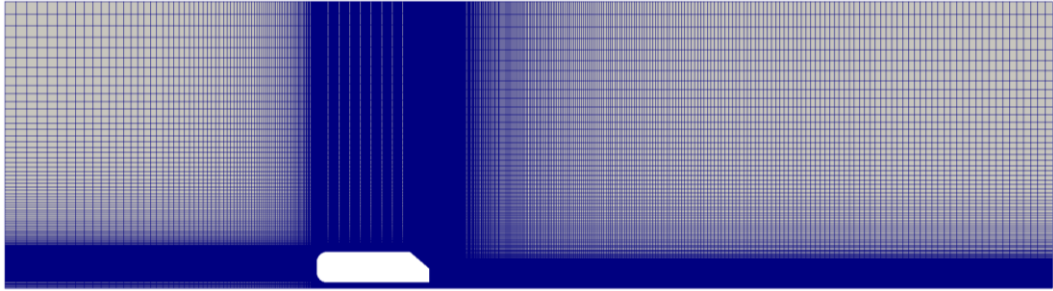


Figura 3.13: Vista completa de la malla v.3

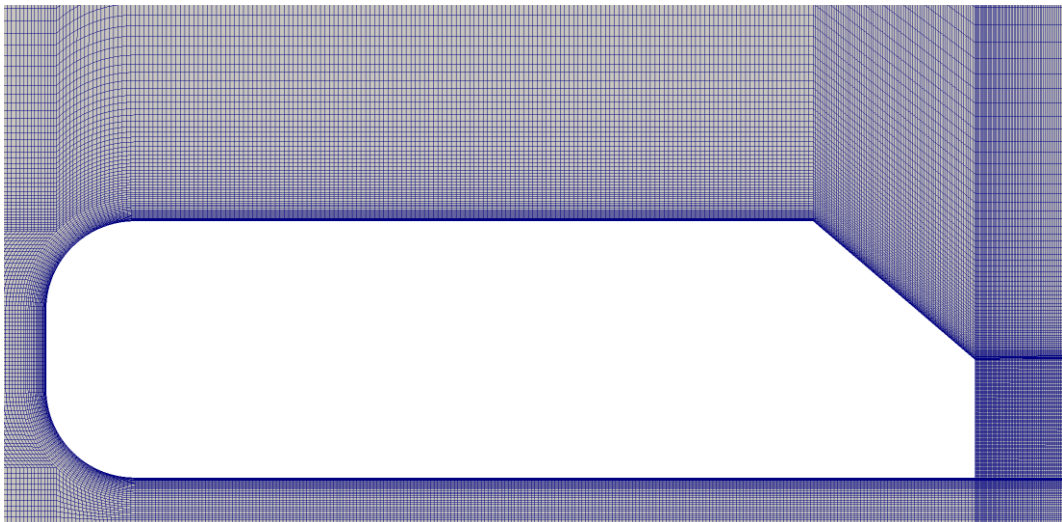


Figura 3.14: Detalle del Ahmed Body de la malla v.3

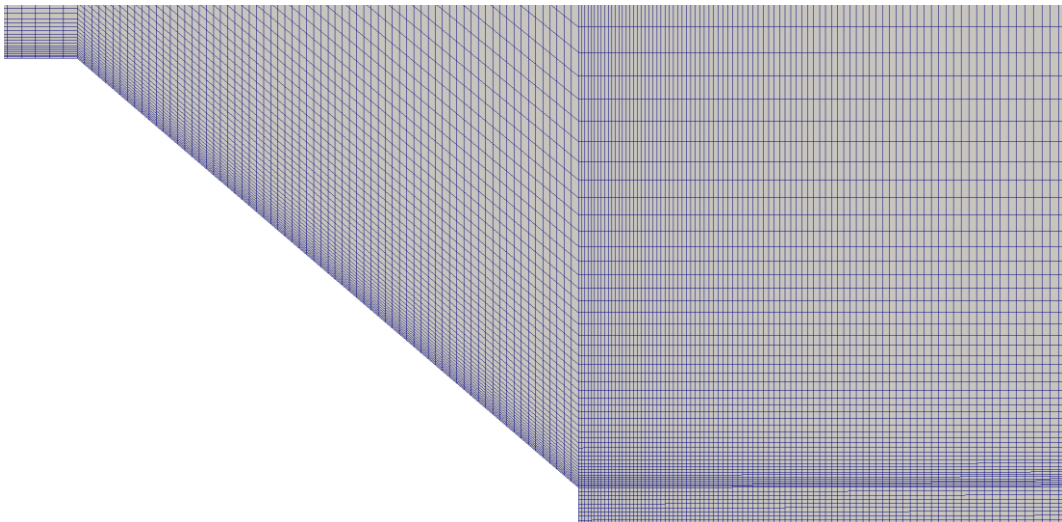


Figura 3.15: Detalle del plano inclinado de 35° en la malla v.3

No obstante para casos donde el flujo es laminar, no es necesaria una malla tan fina para obtener resultados de calidad y, además, se consigue reducir

notablemente el tiempo de computación. En consecuencia, se ha adaptado la malla para ser más gruesa teniendo en cuenta los aspectos mencionados en el apartado 1.12. Dicha malla puede verse detallada en el anexo B.b

1.13.1 Clasificación según el refinado

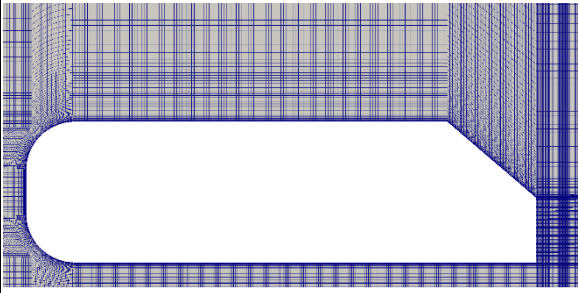

Malla	Reynolds	Celdas	Detalle
Fina	$3E+06$, $2.5E+06$ $2E+06$ $1.5E+06$ $1E+06$ 5000 1000	125.300	
Gruesa	500 200 100	27.250	

Tabla 3.2: Tabla resumen de mallas v3

1.13.2 Clasificación según el ángulo de inclinación

4. Posprocesado

El posprocesado es una de las fases básicas de todo el workflow del CFD implica

Breve descripción de herramientas para el post-procesado

Debido a la ausencia de interfaz gráfica en OpenFOAM se ha recurrido a programas externos para llevar a cabo la fase de posprocesado, como ParaView, gnuplot, o el desarrollo de scripts que ejecuten herramientas específicas de OpenFOAM para automatizar la extracción de datos.

- FunctionObjects: Se trata de una herramienta de posprocesado durante la simulación. Requiere de la modificación del controlDict para incorporar aquellos parámetros, puntos, planos, cortes, fuerzas, campos derivados, yPlus, Courant number, caudales entre muchas otras opciones. Se ha utilizado principalmente para la extracción de las fuerzas y coeficientes aerodinámicos como el la sustentación y la resistencia. Puede verse en detalle la modificación del código del controlDict en el anexo A.0.
- Calculadores de OpenFOAM: El objetivo es representar nuevos campos de datos a partir de los existentes o realizar ciertas operaciones. Utiliza los datos de las carpetas temporales una vez ya ha finalizado la simulación.
 - o foamCalc: Es capaz de separar componentes de datos de campos vectoriales, calcular gradientes o divergencias o añadir o sustraer datos a un campo.
 - o yPlus: como su nombre indica permite obtener el yplus en a lo largo de las caras tipo pared.
 - o patchAverage: Calcula valores medios de un campo a lo largo de planos, caras, etc.
 - o patchIntegrate: calcula valores acumulados de un campo a lo largo de planos, caras, etc.
 - o Vorticity: permite la obtención del campo de vorticidad para cada tiempo.
 - o wallShearStress: Calcula los esfuerzos cortantes en las superficies tipo muro.

Para mayor detalle consultar [2] y [5].

- a. ParaView: Es un completo software de visualización de campos para todo tipo de geometrías o superficies. La opción *Source* permite muestrear datos del campo a través del uso de figuras tales como líneas, puntos o planos entre otros. Por otro lado la opción *Filters* permite aplicar planos cortes, iso-superficies, vectores entre muchas otras opciones para visualizar de la forma deseada los campos estudiados.
- b. Gnuplot: Herramienta que permite graficar directamente datos básicos generados en archivos columnas de archivos de texto, tanto durante la simulación como posteriormente.
Es de vital importancia para controlar la los residuales durante la simulación ya que openFOAM no dispone de interfaz para ello. El código usado para graficar los residuales puede verse en el anexo A.f.
- c. Scripts: Se han creado algunos scripts personalizados para facilitar la tarea de extracción de un sumario de datos específicos interesantes para nuestras simulaciones y que openFOAM no provee en ninguna interfaz. A continuación se describen los campos:
- Tiempo Total simulado
 - Tiempo total de computación
 - ΔT
 - Courant Máximo medio en toda la simulación
 - Últimos valores del $yPlus$
 - $yPlus$ medio en toda la simulación
 - C_D medio en los últimos `outputTimes`
 - C_L medio en los últimos `outputTimes`
 - Drag force medio en los últimos `outputTimes`
 - Lift force medio en los últimos `outputTimes`
 - Graficar y guardar imagen de los residuales $U_x(t)$ y $U_y(t)$
 - Graficar y guardar imagen de los coeficientes $C_p(t)$, $C_D(t)$ y $C_L(t)$
 - Graficar y guardar imagen de las fuerzas de $Lift(t)$, $Drag(t)$, $Moment(t)$.

En la Figura 4.1 puede verse un ejemplo de la salida de datos a través de la terminal de Linux. Se ha detallado el script *Allresults* en el anexo

```

-----
Total sim Time: 1.1
Computation time: 3724
-----
deltaT                1e-04
CoMax medio: 0.185796
-----
last yPlus avg: 0.127253
yPlus mean: 0.139384
-----
CD mean: 2.5599
CL mean: 6.42999
-----
Drag force: 921.291
Lift force: 2313.85
-----

```

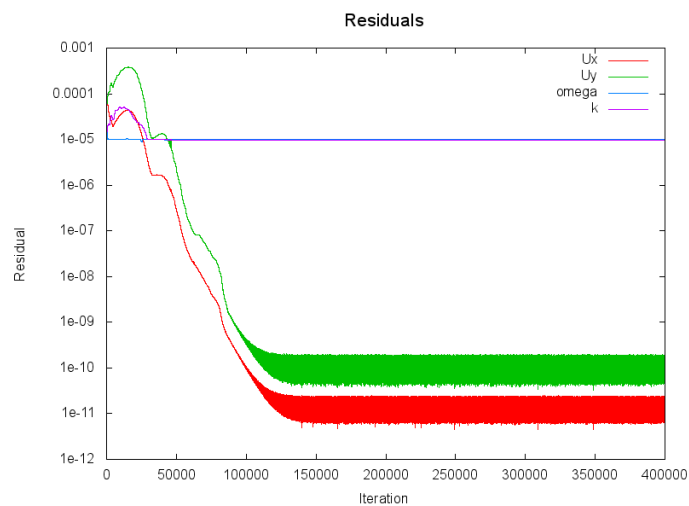
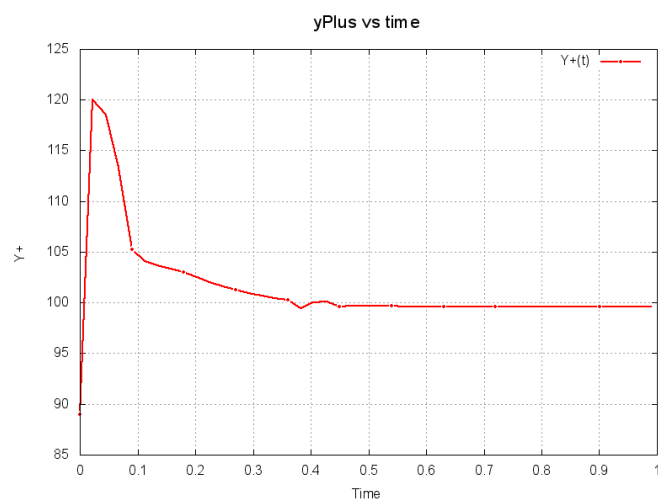
Figura 4.1: Detalle de sumario de datos del script *Allresults*

Figura 4.2: Residuales en función del tiempo

Figura 4.3: $Y+$ en función del tiempo

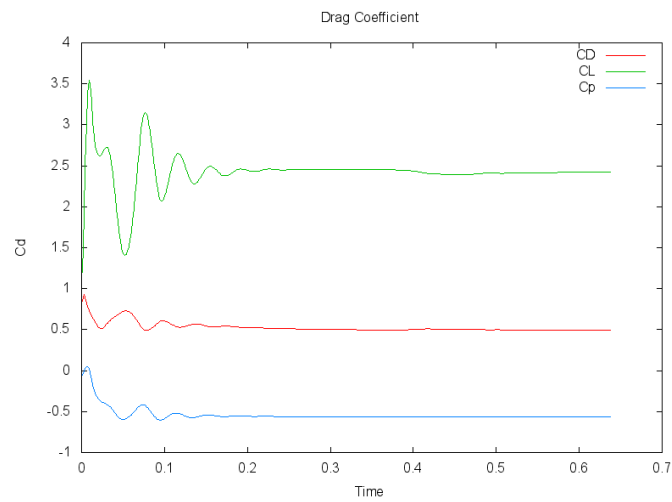
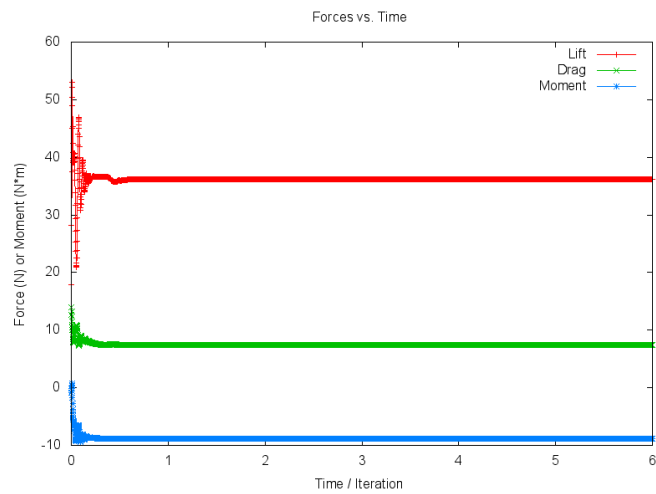
Figura 4.4: Coeficientes C_p , C_d y C_l en función del tiempo

Figura 4.5: Fuerzas de Resistencia, Sustentación y Momento en función del tiempo

5. Resultados

Para las simulaciones se han escogido 10 números de Reynolds diferentes, 5 para régimen laminar y 5 para régimen turbulento. Todos ellos aplicados a tres mallas con distinto ángulo de inclinación, 15°, 25° y 35°.

Se ha escogido un porcentaje de turbulencia del 2%.

Viscosidad cinemática del aire: 1.5E-05

Rég.	Reynolds	Fluido	U [m/s]	k	w	Malla
Turbulento	3,00E+06	Aire	43.1	1,11457	2,36918	Fina
	2,50E+06	Aire	35.92	0,77415	1,97450	Fina
	2E+06	Aire	28.74	0,49559	1,57982	Fina
	1,5E+06	Aire	21.55	0,27864	1,18459	Fina
	1E+06	Aire	14.37	0,12442	0,79156	Fina
Laminar	5000	Otro	5	-	-	Fina
	1000	Otro	5	-	-	Fina
	500	Otro	5	-	-	Gruesa
	200	Otro	5	-	-	Gruesa
	100	Otro	5	-	-	Gruesa

Tabla 5.1: Resumen de simulaciones para los casos con ángulos de 15°, 25° y 35°

Cabe mencionar que, debido a la inestabilidad del solver para resolver Reynolds muy bajos con aire, se ha cambiado la viscosidad cinemática de forma manual (equivalente a cambiar el medio o fluido) y manteniendo una velocidad constante en laminar de 5 m/s, con tal de asumir un número de Reynolds bajo.

1.15 Régimen estacionario:

Se analizarán dos casos estacionarios con Reynolds lo más alejados posibles para régimen turbulento y otros dos para régimen laminar, con el objetivo de ver las claras diferencias entre ambos. Se usará para las figuras siguientes únicamente el caso con ángulo de inclinación de 35° , pues no se verían diferencias notables entre diferentes ángulos para un mismo Reynolds.

- Flujo turbulento:

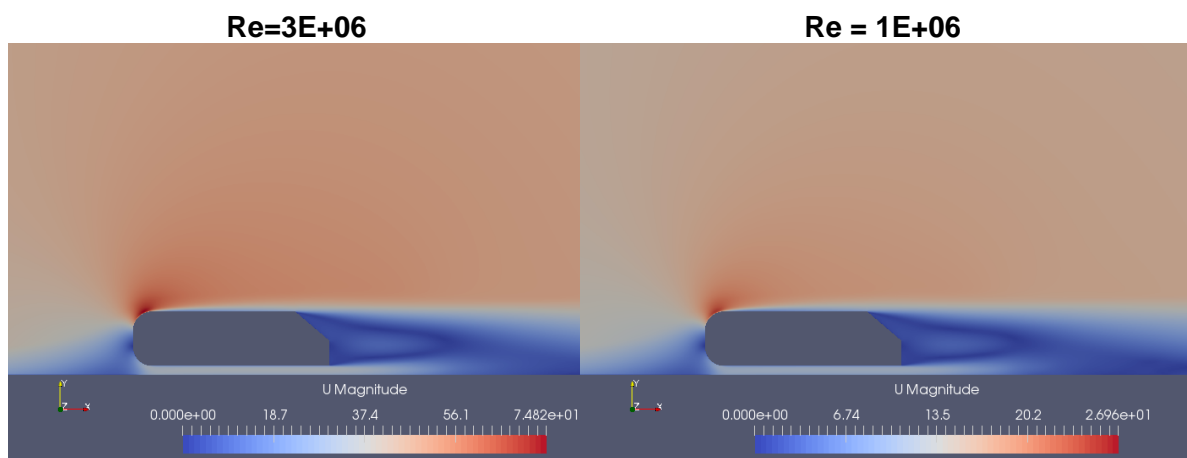


Figure 5.1: Velocidad para Reynolds $3E+06$ y

Figure 5.2: : Velocidad para Reynolds $1E+06$ y

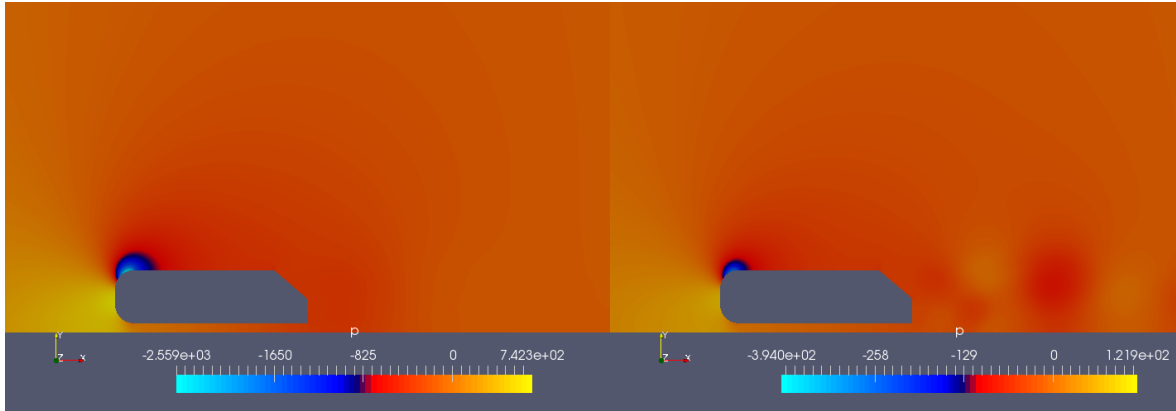


Figure 5.3: Presiones para Reynolds 3E+06

Figure 5.4: : Presiones para Reynolds 1E+06

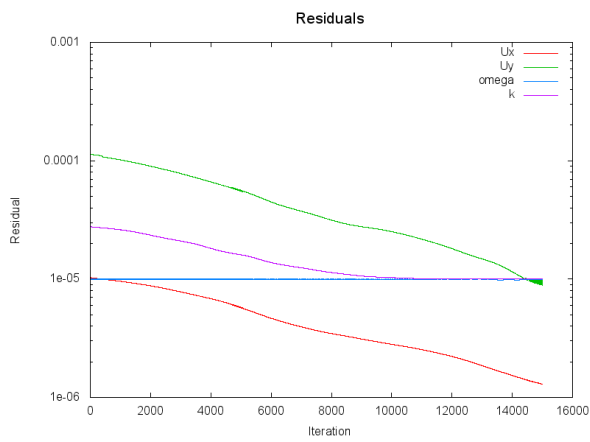


Figure 5.5: Residuales para Reynolds 3E+06

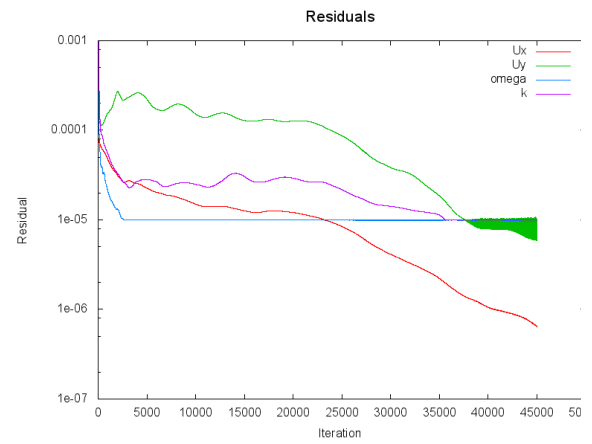


Figure 5.6: Residuales para Reynolds 1E+06

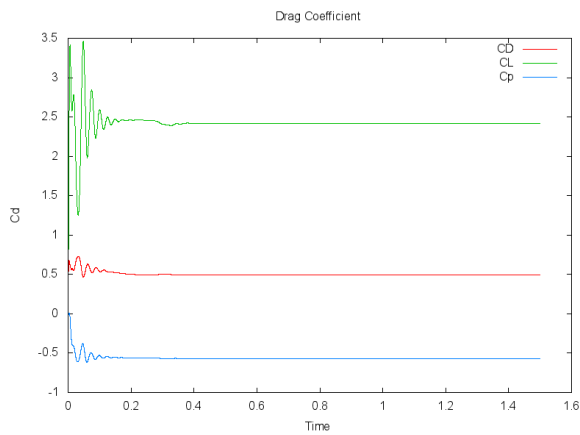


Figure 5.7: Coeficientes para Reynolds 3E+06

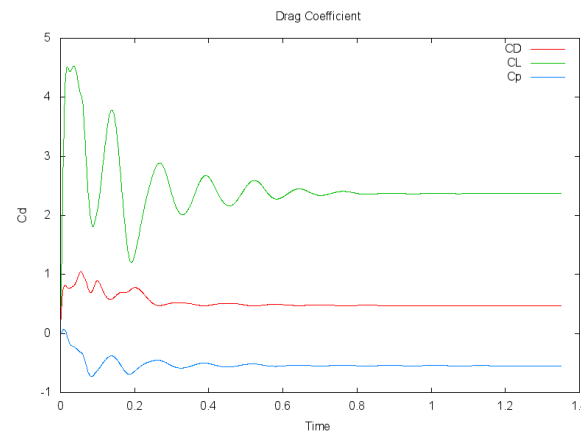


Figure 5.8: Coeficientes para Reynolds 1E+06

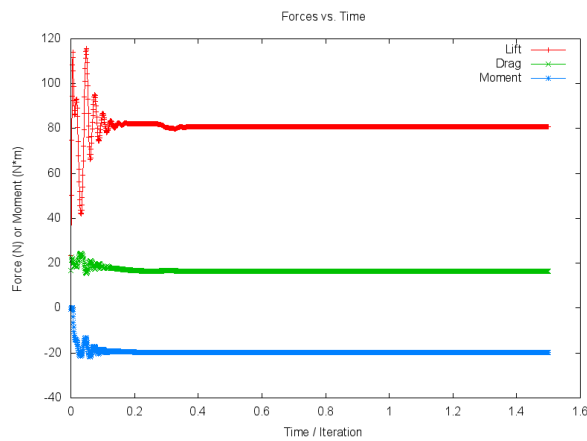


Figure 5.9: Fuerzas para para Reynolds 3E+06

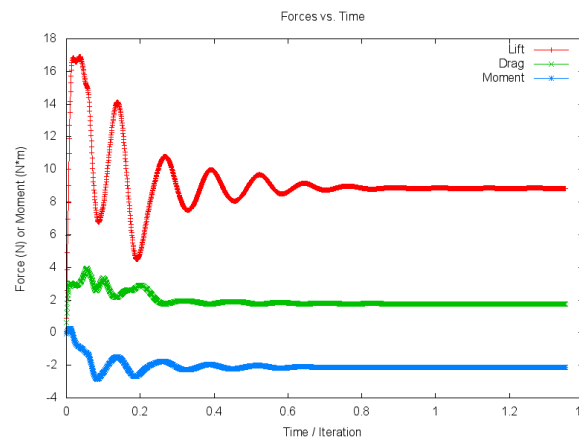


Figure 5.10: para Reynolds 1E+06

Como se puede observar la convergencia es mucho más rápida en Reynolds altos. Además existe una diferencia muy acusada entre la magnitud de las fuerzas y presiones.

- Régimen laminar:

Re = 10000

Re = 200

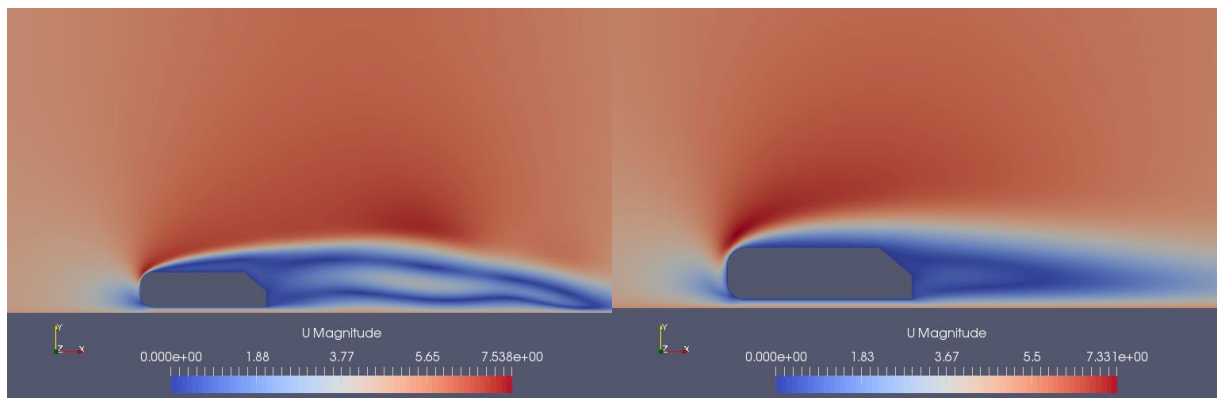


Figure 5.11

Figure 5.12

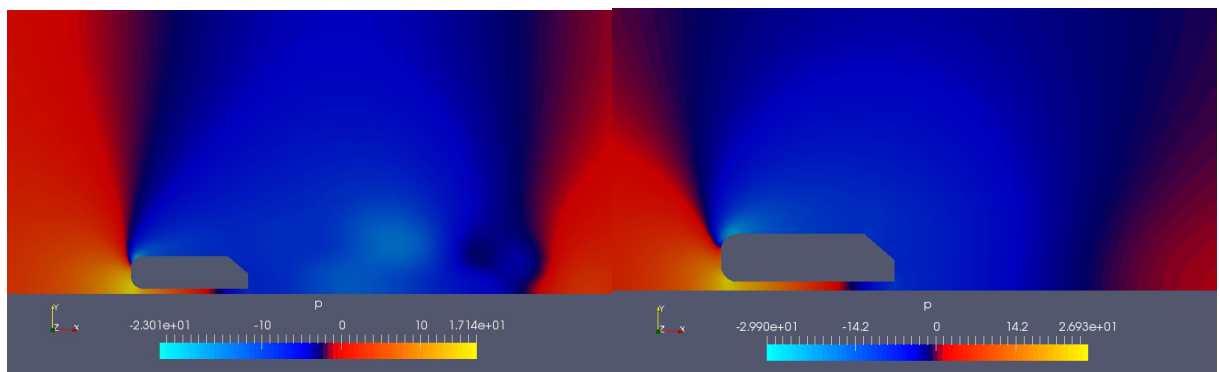


Figure 5.13

Figure 5.14

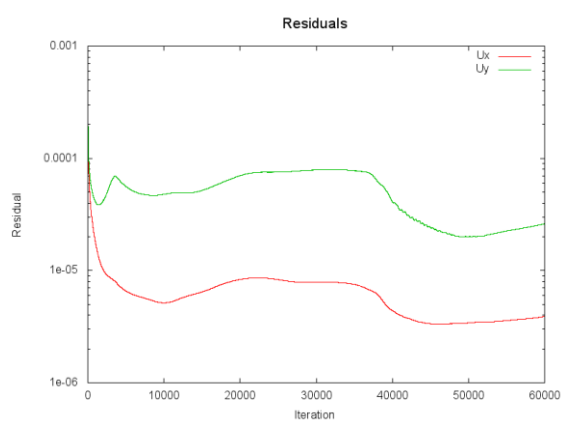


Figure 5.15

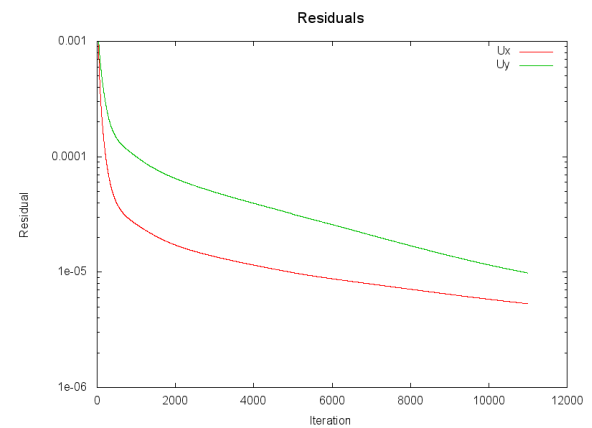


Figure 5.16

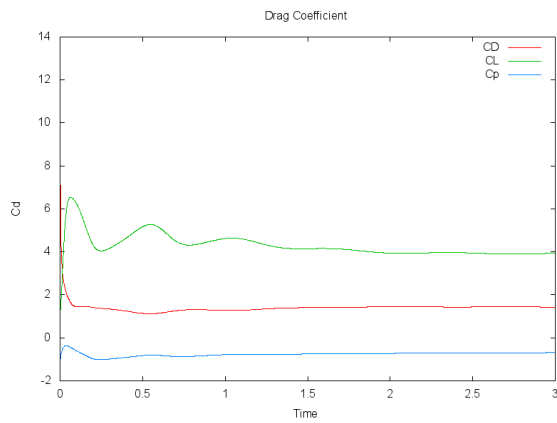


Figure 5.17

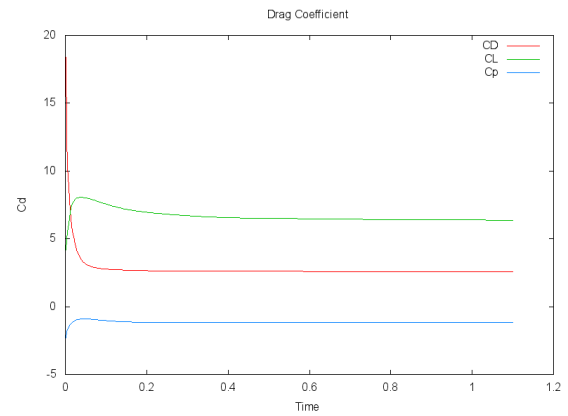


Figure 5.18

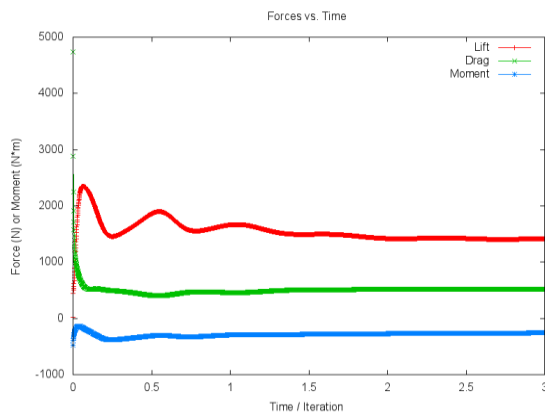


Figure 5.19

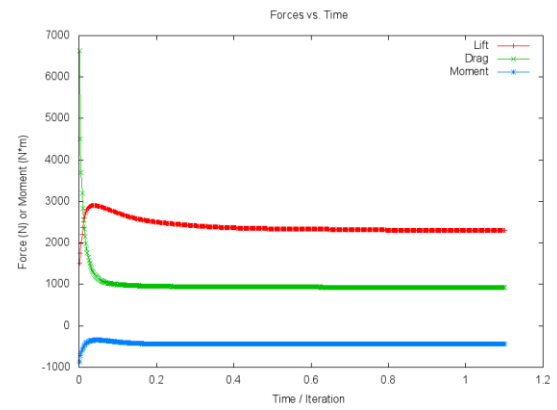
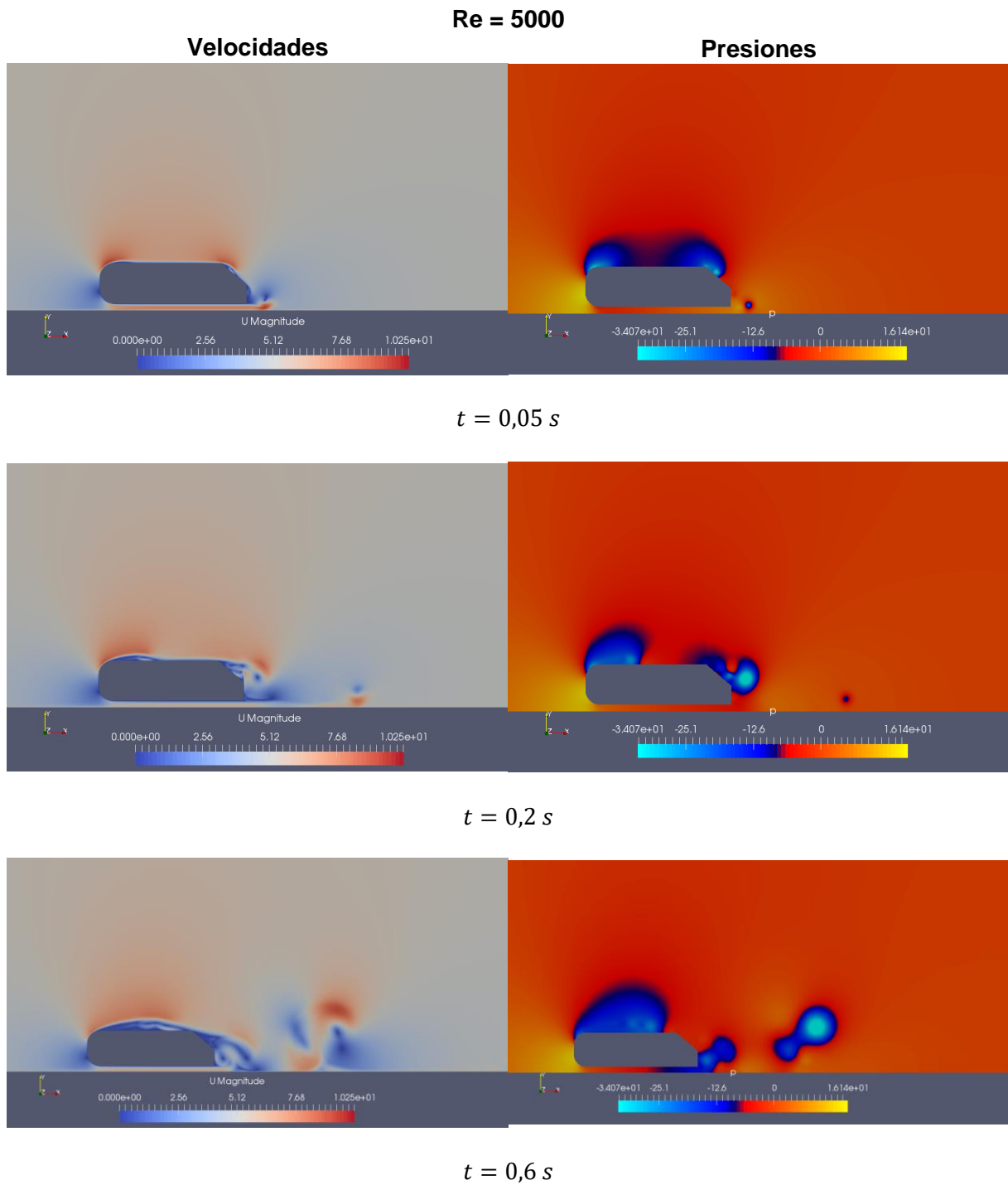


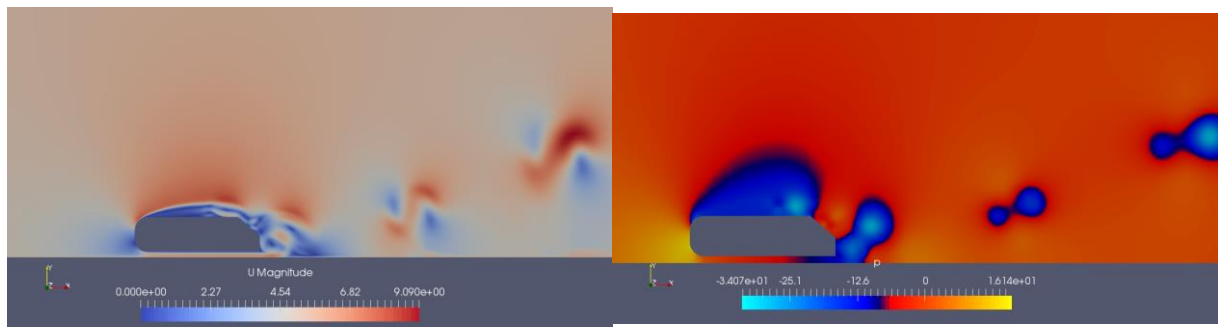
Figure 5.20

Se aprecia un aumento de las fuerzas a medida que se disminuye el Reynolds. La estela es muy acusada en Re 1000 en comparación con Re 200.

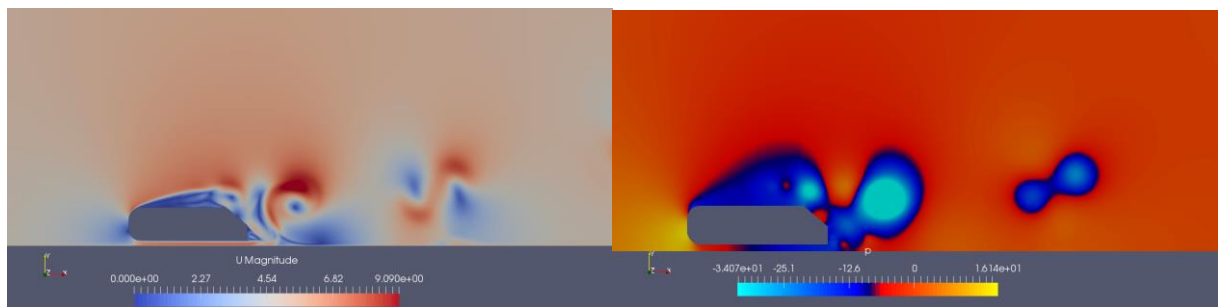
1.16 Régimen transitorio

A continuación se toman muestras de velocidad y de presiones para diferentes tiempos de forma que se pueda visualizar la evolución y la formación de remolinos en una simulación transitoria.

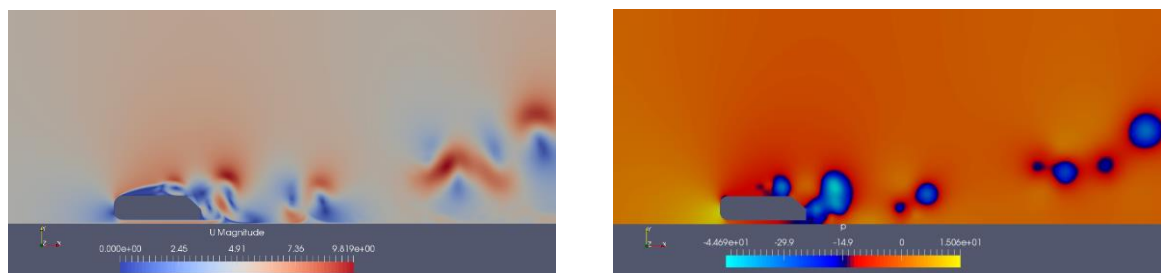




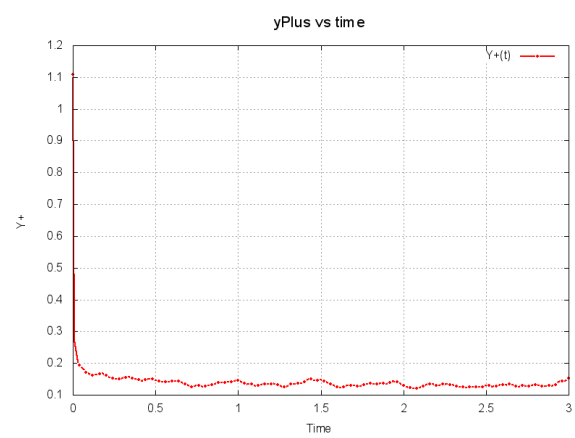
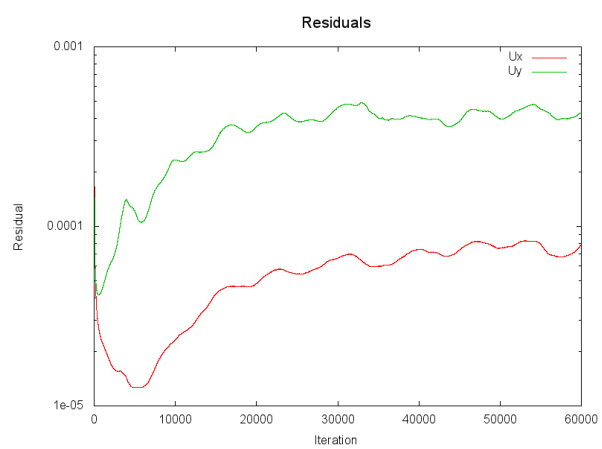
$t = 1 \text{ s}$

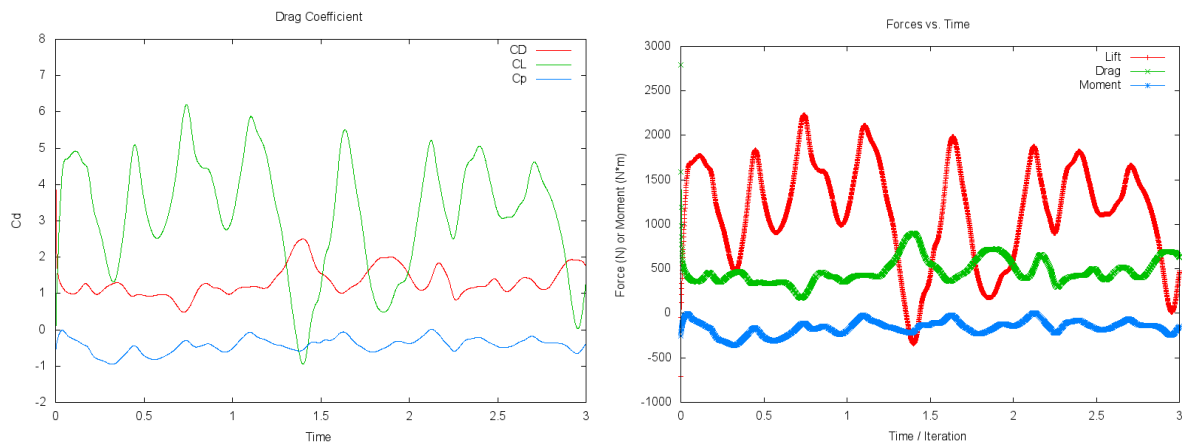


$t = 1,5 \text{ s}$



$t = 3 \text{ s}$





Observación del fenómeno de desprendimiento de vortex con una frecuencia muy marcada como se puede ver en la gráfica de coeficientes y de fuerzas.

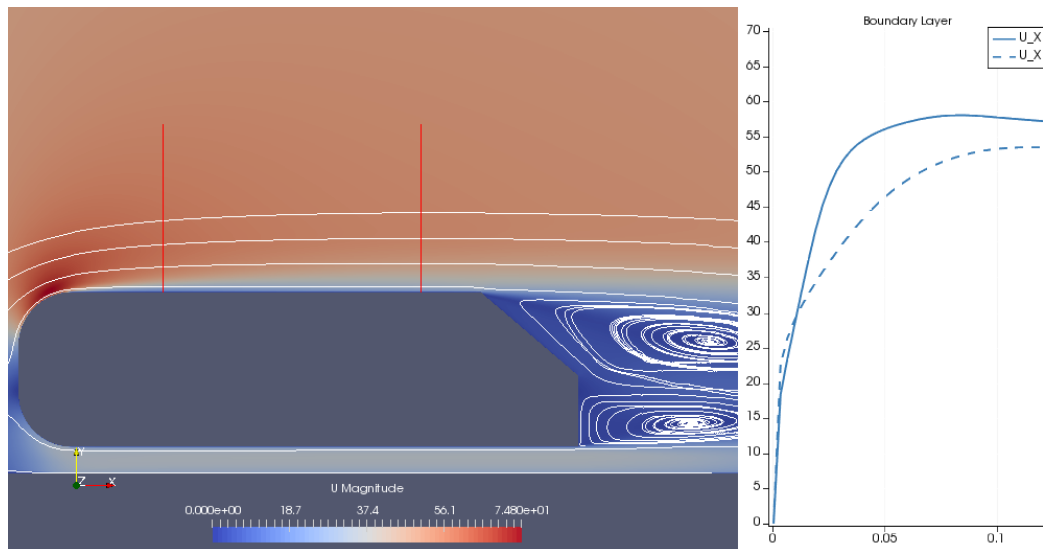
En esta simulación los residuales son relativamente altos ya que las variaciones son grandes y nunca llega a converger.

El algoritmo de resolución utilizado es PIMPLE con `nOuterIterations` igual a 1, lo que quiere decir que trabaja con algoritmo

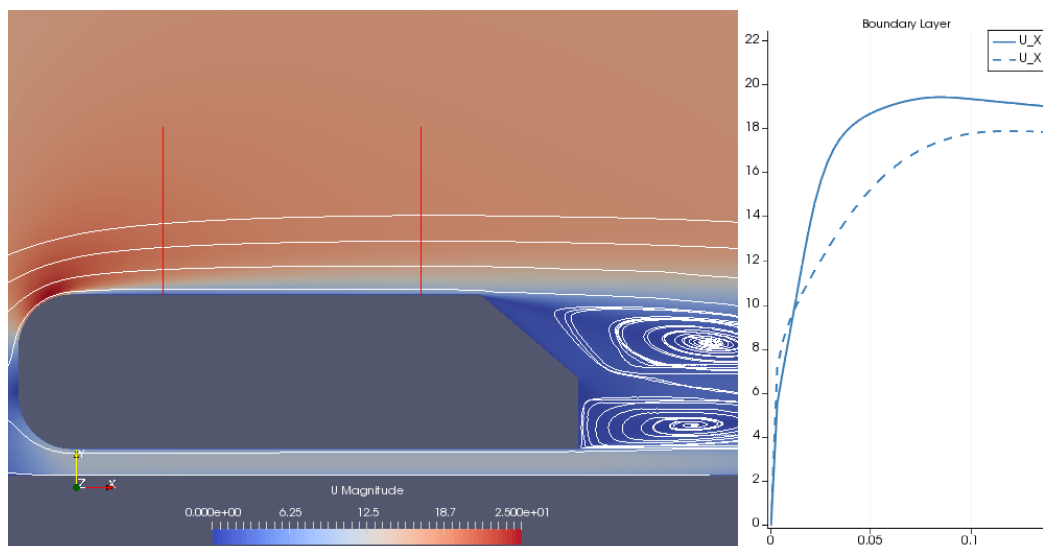
1.17 Observación de la capa límite

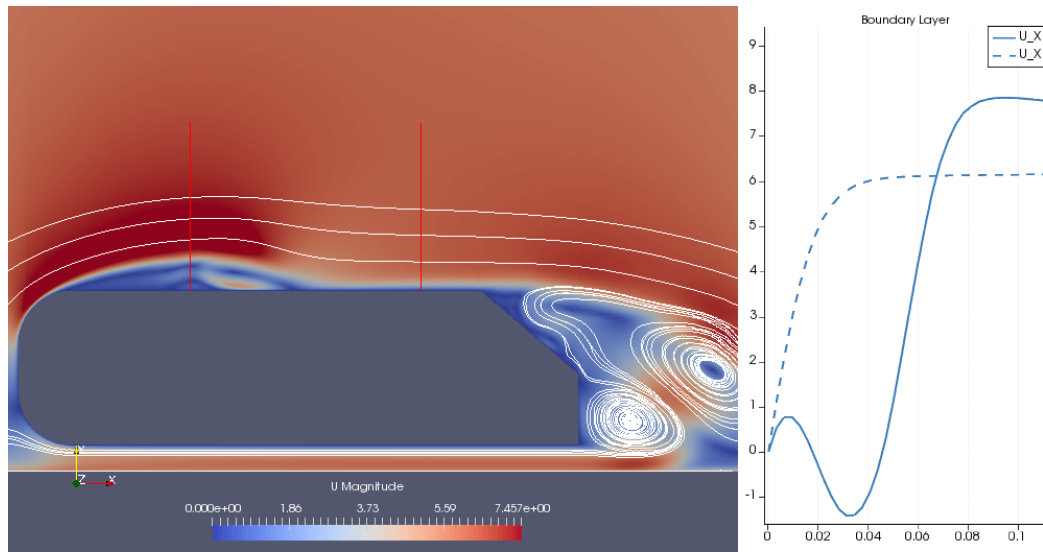
A continuación se grafica el perfil de velocidades U_x a lo largo de la línea mostrada, con el objetivo de observar la capa límite en diferentes Reynolds.

Reynolds = $3E+06$

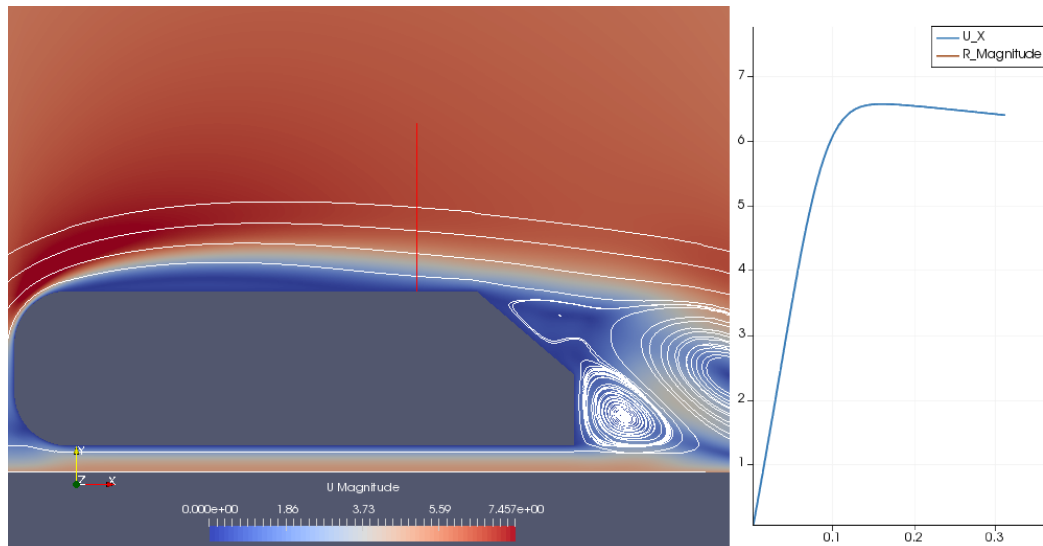


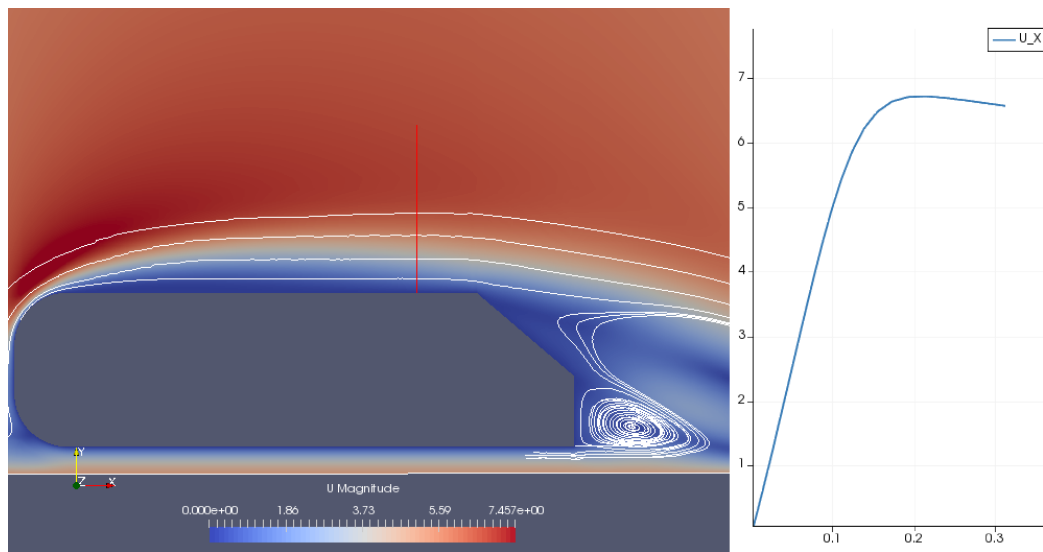
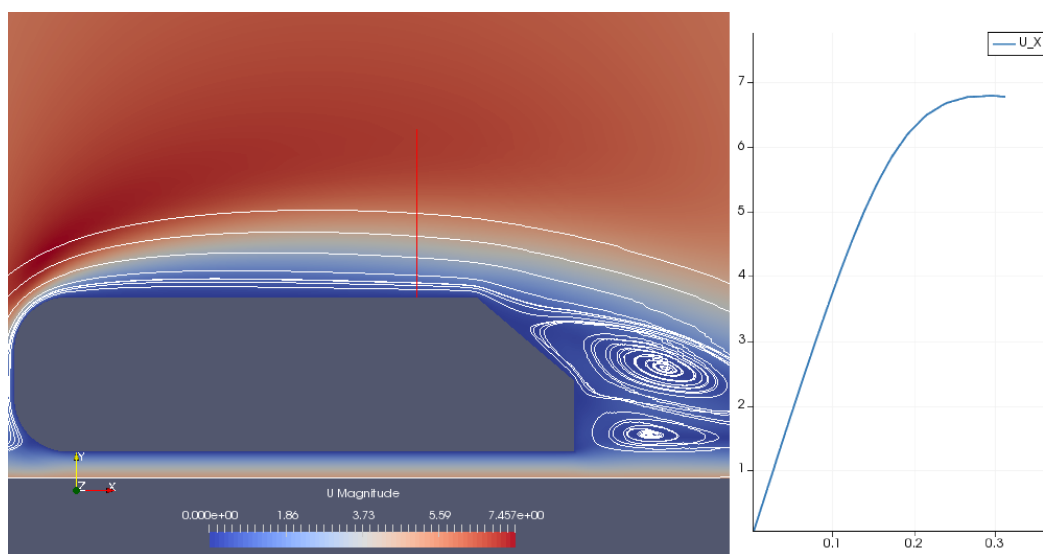
Reynolds = $1E+06$



Reynolds = 5000

El caso de Reynolds 5000 es especialmente interesante ya que se produce desprendimiento de capa límite así como vortex shedding. En la zona de desprendimiento (primera línea) puede verse que hay inversión del sentido del flujo y por tanto valores negativos de velocidad

Reynolds = 1000

Reynolds = 500**Reynolds = 200**

Se puede apreciar una cierta correlación entre el número de Reynolds y el grosor de la capa límite. Además, para Reynolds turbulento se observa un cambio en la forma del perfil de velocidades al llegar a la zona más próxima a la pared (es posible ver la interpolación lineal en la última celda). Esto tiene una relación directa con el parámetro Y^+ . Mientras que en los casos con flujo laminar la curva es mucho más suave en la zona cercana a la pared. El valor del Y^+ medio puede ser consultado en la Tabla 5.3.

Reynolds	Grosor de capa límite [cm]
3E+06	5-6
1E+06	5-8
5000	3-8
1000	15
500	20
200	30

Tabla 5.2: Relación entre el Reynolds y el grosor de capa límite

1.18 Tabla resumen de simulaciones

A continuación se muestra una tabla resumen de todas las simulaciones realizadas a lo largo del proyecto. Y los parámetros de simulación recolectados.

Reynolds		Ángulo de chaflán		
		15°	25°	35°
3,00E+06	t simulación	0,50	0,50	0,40
	timeStep	1,00E-05	1,00E-05	1,00E-05
	Courant mean	0,54	0,48	0,46
	Y+ mean	153,65	150,75	133,60
	Drag	13,48	16,42	15,86
	Lift	99,06	80,97	79,39
	Cd mean	0,40	0,49	0,47
	Cl mean	2,95	2,42	2,37
2,50E+06	t simulación	0,70	0,70	0,64
	timeStep	1,20E-05	1,20E-05	1,20E-05
	Courant mean	0,53	0,51	0,46
	Y+ mean	127,18	124,98	110,73
	Drag	9,32	11,50	10,94
	Lift	68,42	56,03	55,11
	Cd mean	0,40	0,50	0,47
	Cl mean	2,95	2,42	2,37
2,00E+06	t simulación	2,11	6,00	1,00
	timeStep	1,50E-05	1,50E-05	1,50E-05
	Courant mean	0,49	0,47	0,53
	Y+ mean	99,71	99,06	98,72
	Drag	6,04	7,40	7,97

	Lift	43,93	36,14	33,37
	Cd mean	0,40	0,50	0,53
	Cl mean	2,94	2,42	2,23
1,50E+06	t simulación	1,00	1,00	1,27
	timeStep	2,00E-05	2,00E-05	2,00E-05
	Courant mean	0,54	0,50	0,76
	Y+ mean	76,36	74,89	67,06
	Drag	3,41	4,17	3,93
	Lift	24,43	20,07	19,72
	Cd mean	0,41	0,50	0,47
	Cl mean	2,94	2,41	2,37
1,00E+06	t simulación	1.10	1,10	1,35
	timeStep	1,00E-05	1,00E-05	3,00E-05
	Courant mean	0.17	0,16	0,53
	Y+ mean	44.57	42,89	43,08
	Drag	1,46	2,00	1,77
	Lift	11,11	9,58	8,85
	Cd mean	0,39	0,54	0,47
	Cl mean	2,98	2,57	2,37
5,00E+03	t simulación	3,00	3,00	3,00
	timeStep	5,00E-05	5,00E-05	5,00E-05
	Courant mean	0,60	0,58	0,56
	Y+ mean	0,14	0,14	0,14
	Drag	356,75	456,80	559,69
	Lift	1018,62	1334,09	890,53
	Cd mean	0,99	1,28	1,55
	Cl mean	2,81	3,70	2,53
1,00E+03	t simulación	3,00	3,00	3,00
	timeStep	5,00E-05	5,00E-05	5,00E-05
	Courant mean	0,29	0,30	0,30
	Y+ mean	0,04	0,04	0,04
	Drag	514,87	516,79	517,86
	Lift	1421,26	1416,17	1409,53
	Cd mean	1,43	1,44	1,44
	Cl mean	3,95	3,93	3,92
5,00E+02	t simulación	2,00	2,00	2,00
	timeStep	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04
	Courant mean	0,20	0,20	0,20
	Y+ mean	0,22	0,22	0,24
	Drag	565,98	570,47	571,93
	Lift	1855,58	1845,53	1842,09
	Cd mean	1,57	1,58	1,59

	Cl mean	5,16	5,13	5,12
2,00E+02	t simulación	1,10	1,10	1,10
	timeStep	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04
	Courant mean	0,19	0,19	0,19
	Y+ mean	0,14	0,14	0,14
	Drag	921,29	922,60	928,32
	Lift	2313,85	2320,68	2314,58
	Cd mean	2,56	2,56	2,58
	Cl mean	6,43	6,45	6,43
1,00E+02	t simulación	0,60	0,60	0,80
	timeStep	1,00E-03	1,00E-03	5,00E-04
	Courant mean	2,71	0,39	0,20
	Y+ mean	0,12	0,13	0,11
	Drag	83,27	78,61	80,57
	Lift	115,90	123,82	122,59
	Cd mean	4,45	5,52	5,30
	Cl mean	6,24	8,60	8,07

Tabla 5.3: Tabla global de simulaciones

Dado que se trata de un formato de presentación de datos muy completo pero muy difícil de comprender. En el siguiente apartado se ha procedido a la graficar los resultados de las fuerzas y coeficientes obtenidos según el Reynolds y el ángulo de inclinación

1.19 Coeficientes y fuerzas

Representación visual de los datos obtenidos.

1.19.1 Coeficiente de resistencia

Detalle del coeficiente de resistencia para todos los casos

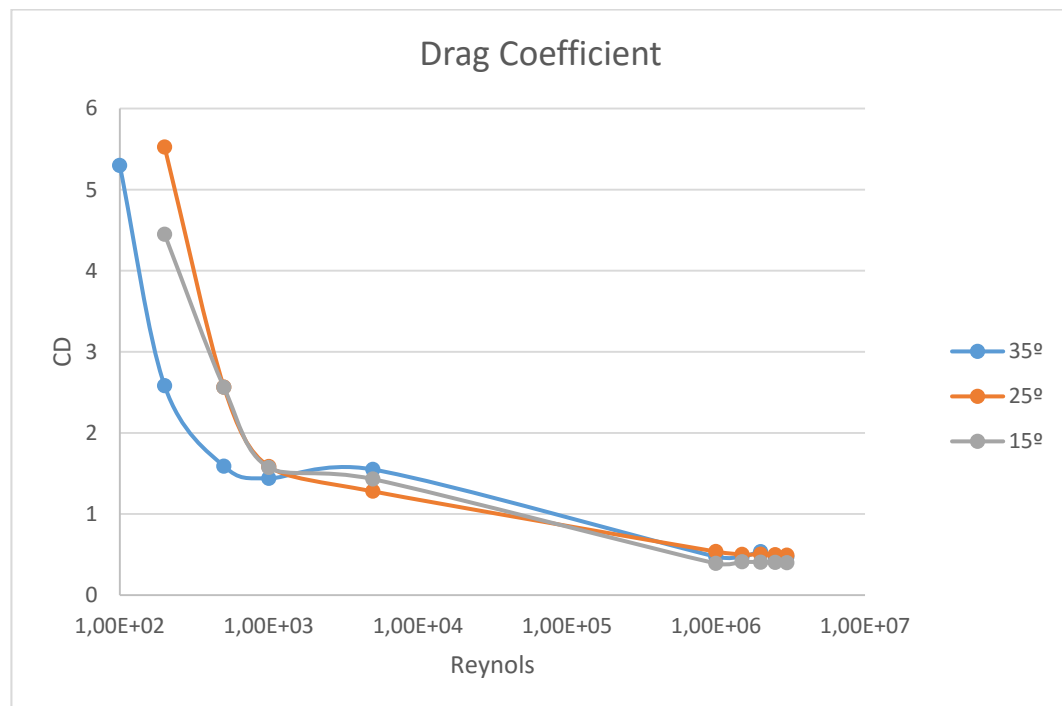


Figura 5.1: Coeficiente de resistencia para todos los casos

Detalle de coeficiente de resistencia para régimen turbulento

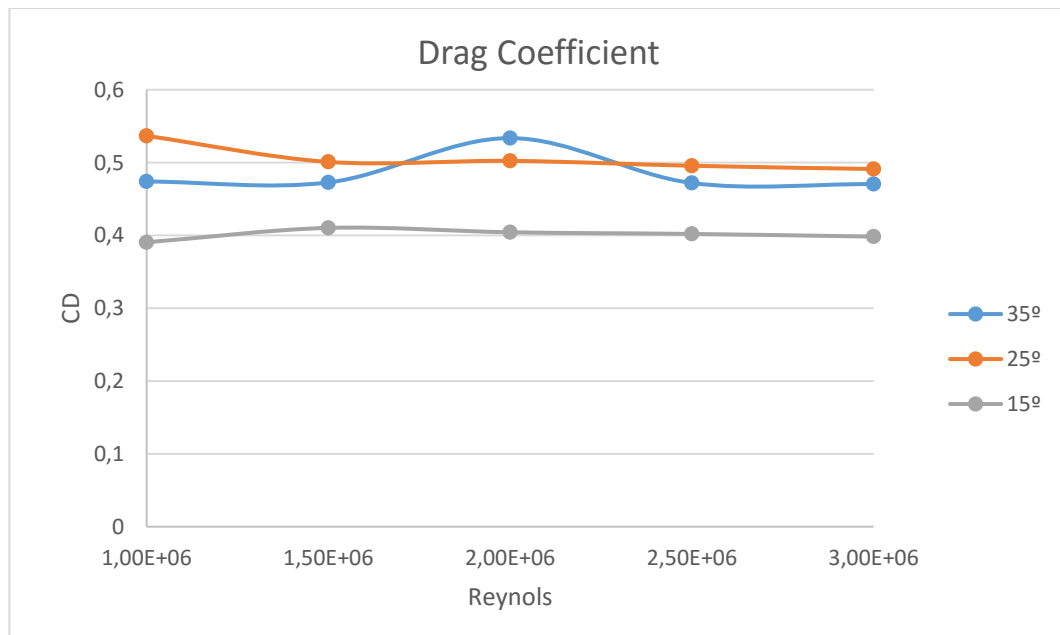


Figura 5.2: Detalle de coeficiente de resistencia para régimen turbulento

Detalle de coeficiente de resistencia para régimen laminar:

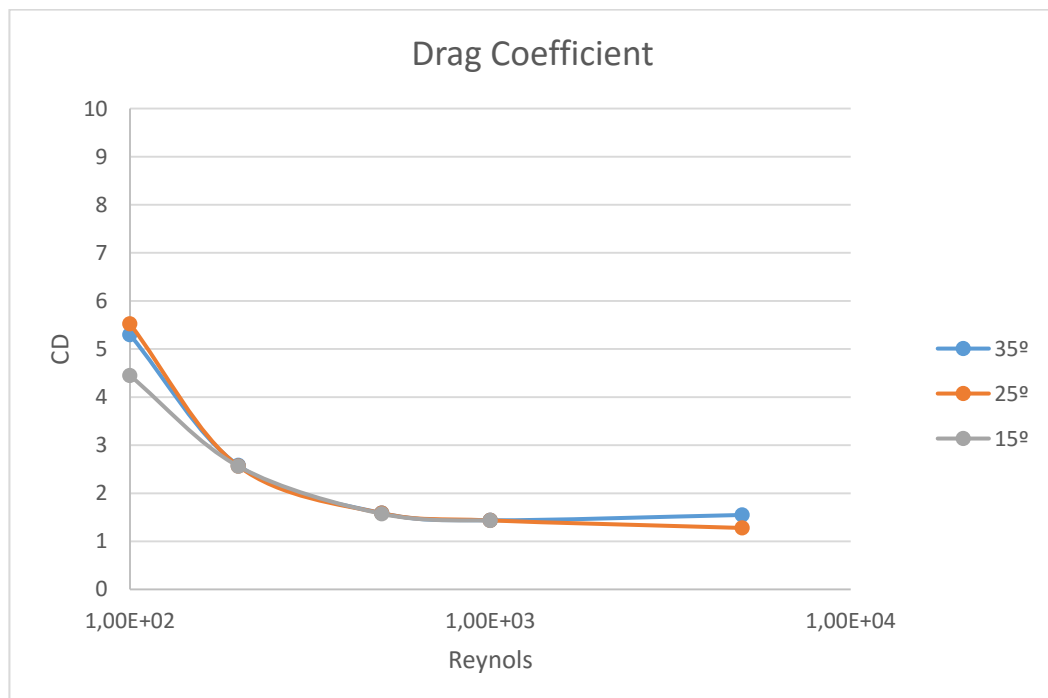


Figura 5.3: Detalle de coeficiente de resistencia para régimen laminar

1.19.2 Coeficiente de sustentación

Detalle del coeficiente de sustentación para todos los casos

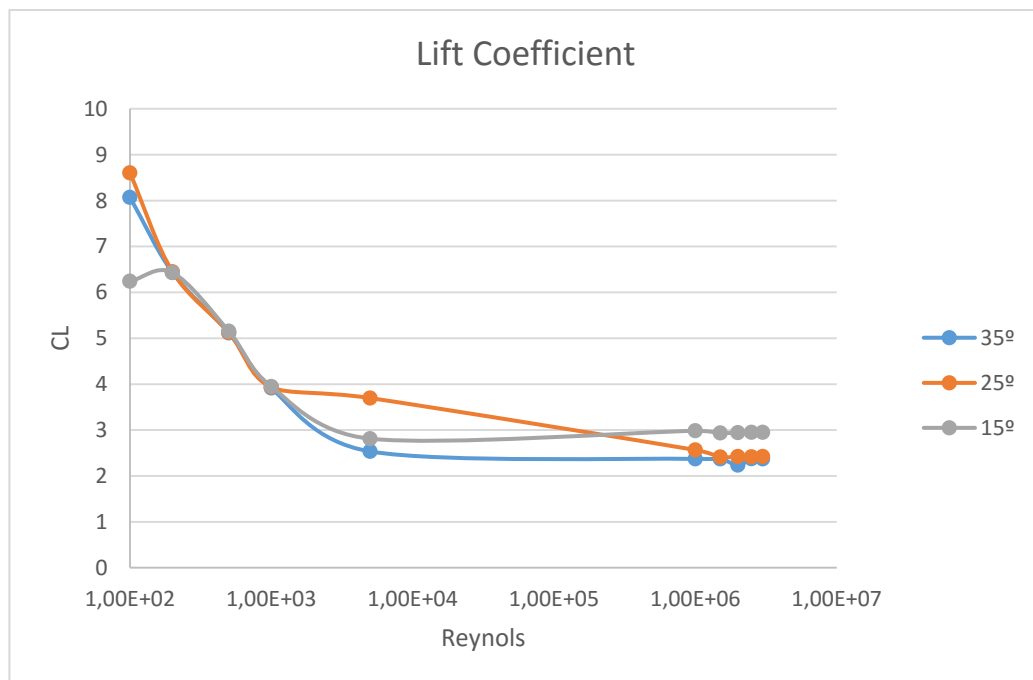


Figura 5.4: Detalle del coeficiente de sustentación para todos los casos

Detalle del coeficiente de sustentación para régimen turbulento



Figura 5.5: Detalle del coeficiente de sustentación para régimen turbulento

Detalle del coeficiente de sustentación para régimen laminar:

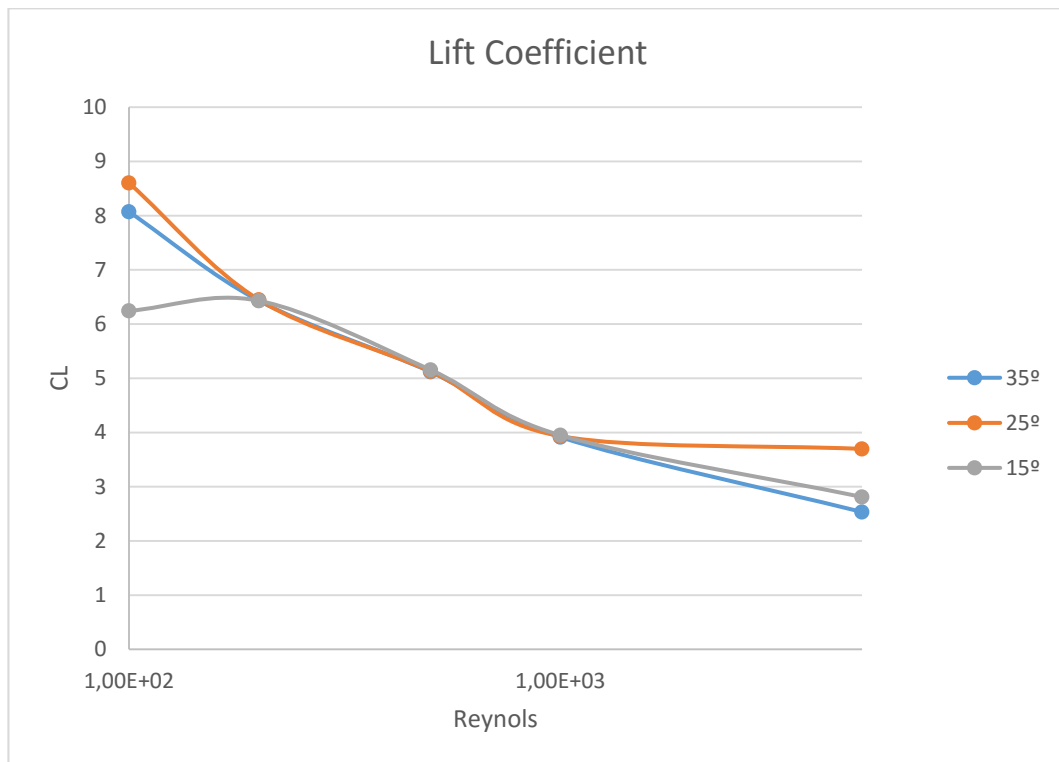


Figura 5.6: Detalle del coeficiente de sustentación para régimen laminar

Más adelante en el apartado de fuerzas se verán los efectos reales.

Podemos observar para régimen turbulento, que para un mismo ángulo, no existe variación perceptible del coeficiente a diferentes velocidades

1.19.3 Fuerza de resistencia aerodinámica (Drag Force)

Detalle de la fuerza de resistencia para todos los casos

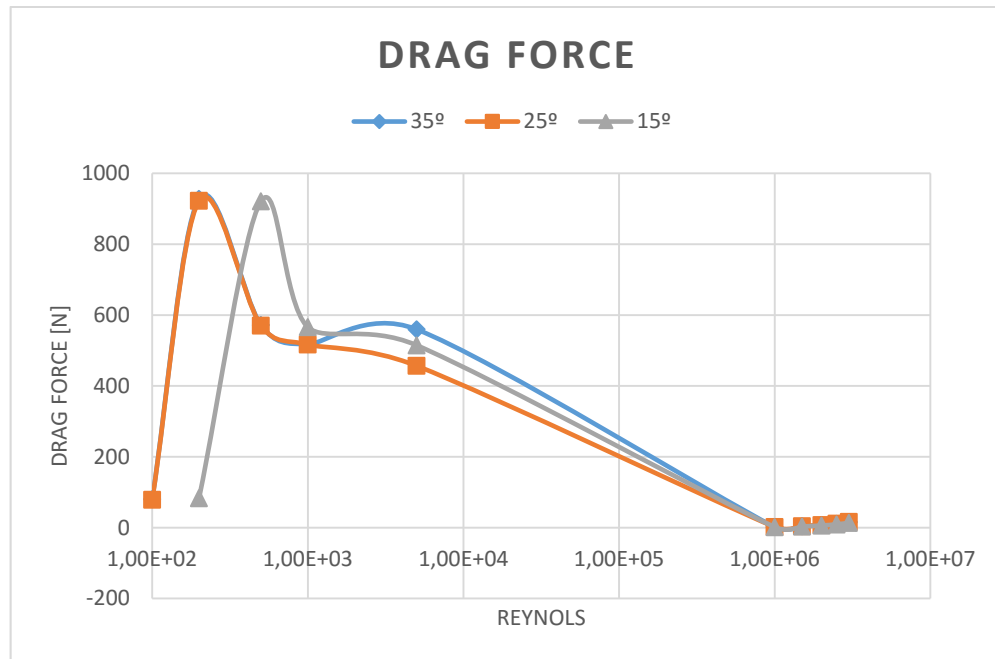


Figura 5.7: Detalle de la fuerza de resistencia para todos los casos

Detalle de la fuerza de resistencia para régimen turbulento:

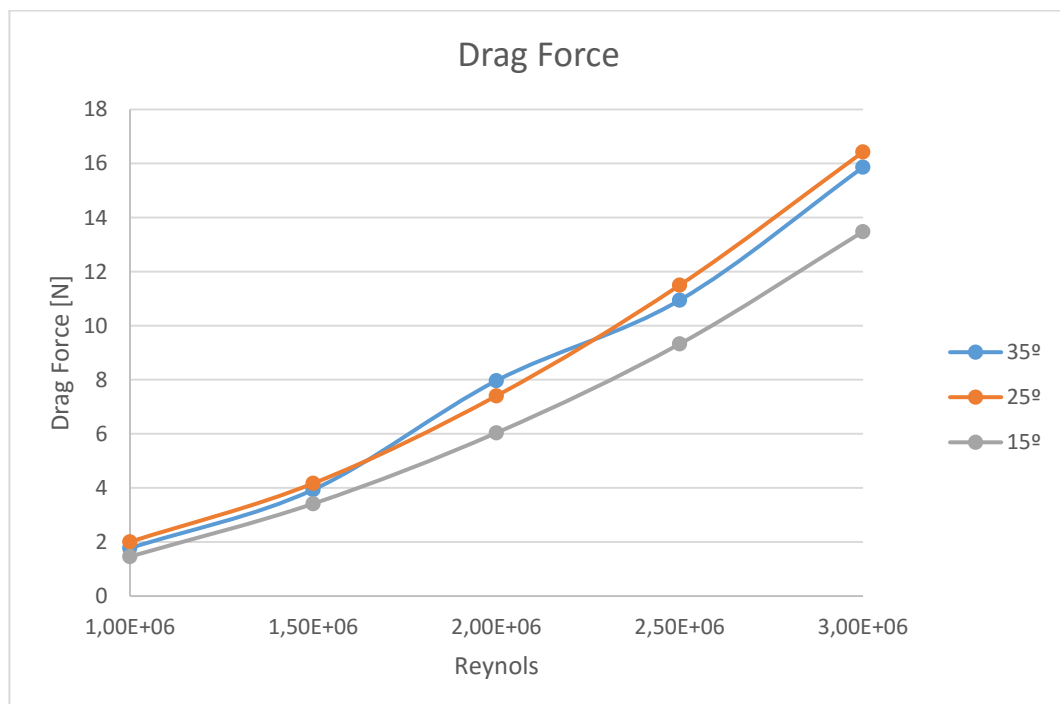


Figura 5.8: Detalle de la fuerza de resistencia para regimen turbulento

Detalle de la fuerza de resistencia para régimen laminar:

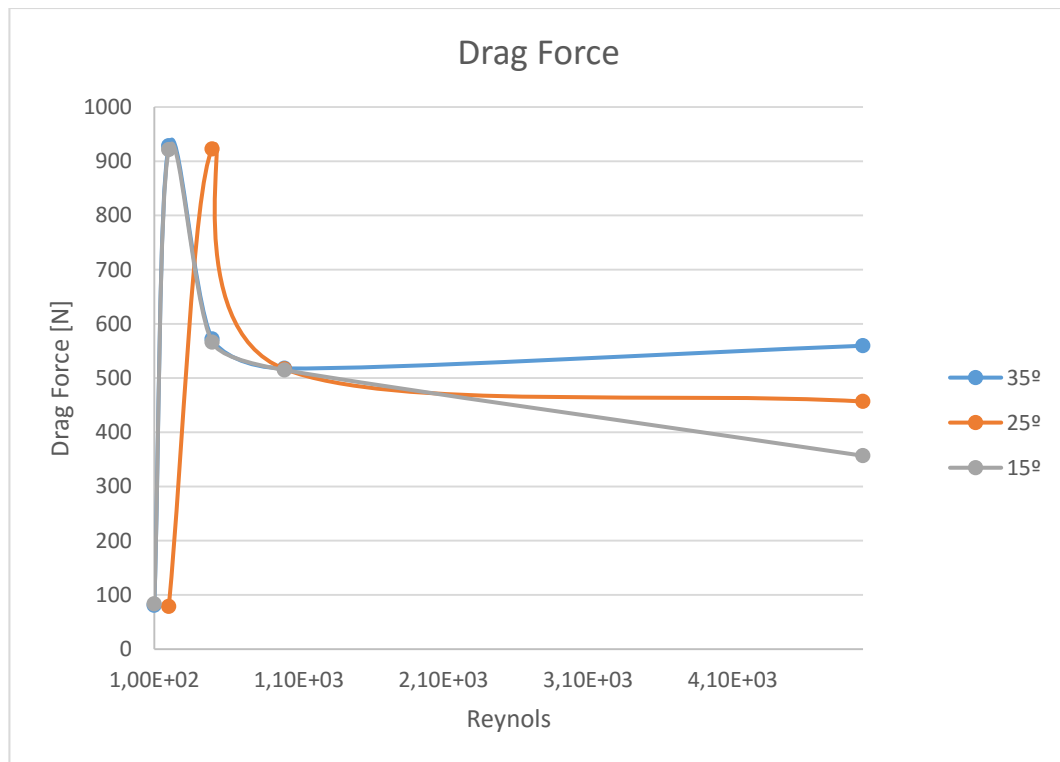


Figura 5.9: Detalle de la fuerza de resistencia para régimen laminar

Como se puede observar para régimen turbulento el que sale más beneficiado es el ángulo de 25°. Podría pensarse a priori que el caso más favorable debería ser para un ángulo de 15°, pero con esa geometría el Ahmed empieza a parecerse más un cuerpo con la salida en ángulo recto.

Otra observación es la diferencia en la magnitud de las fuerzas entre los Reynolds más bajos frente a los más altos. La fuerza resistente se incrementa en 8x mientras la velocidad sólo lo hace en 3x. Es aquí donde se pueden encontrar las causas de la mayor eficiencia del consumo de combustible a bajas velocidades respecto a las altas.

1.19.4 Fuerza de sustentación (Lift Force)

Detalle de la fuerza de sustentación para todos los casos

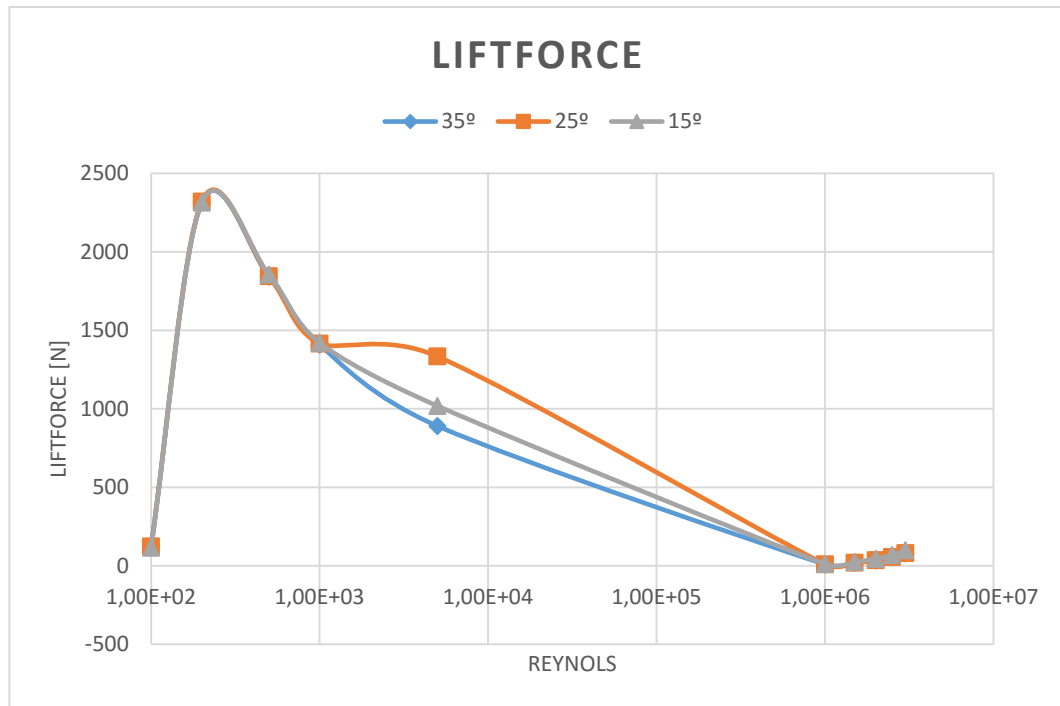


Figura 5.10: Detalle de la fuerza de sustentacion para todos los casos

Detalle de la fuerza de sustentación para régimen turbulento:

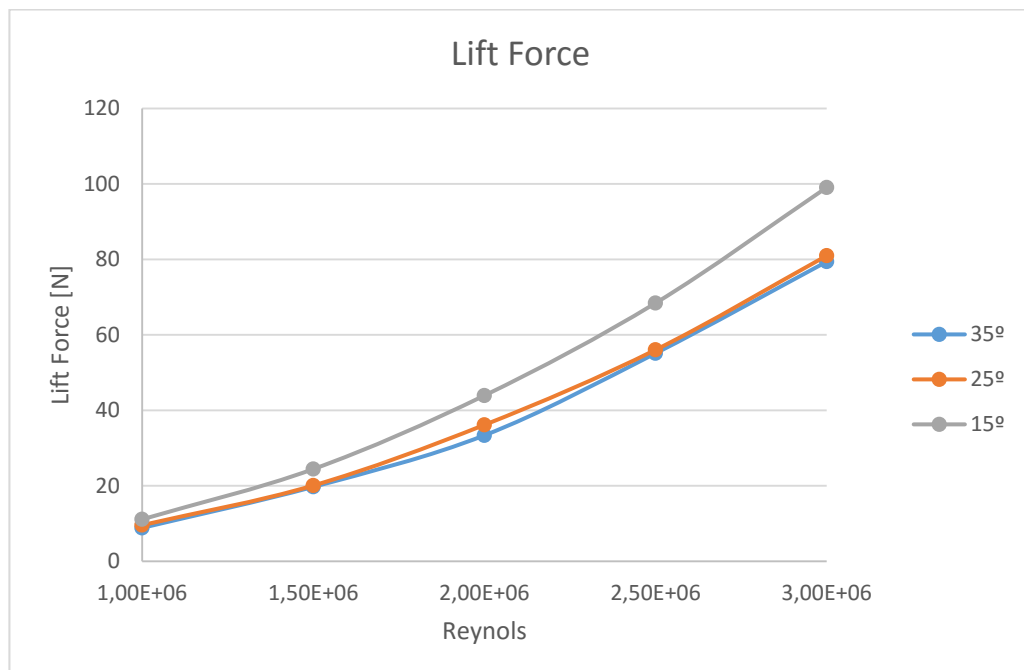


Figura 5.11: Detalle de la fuerza de sustentación para régimen turbulento

Detalle de la fuerza de sustentación para régimen laminar

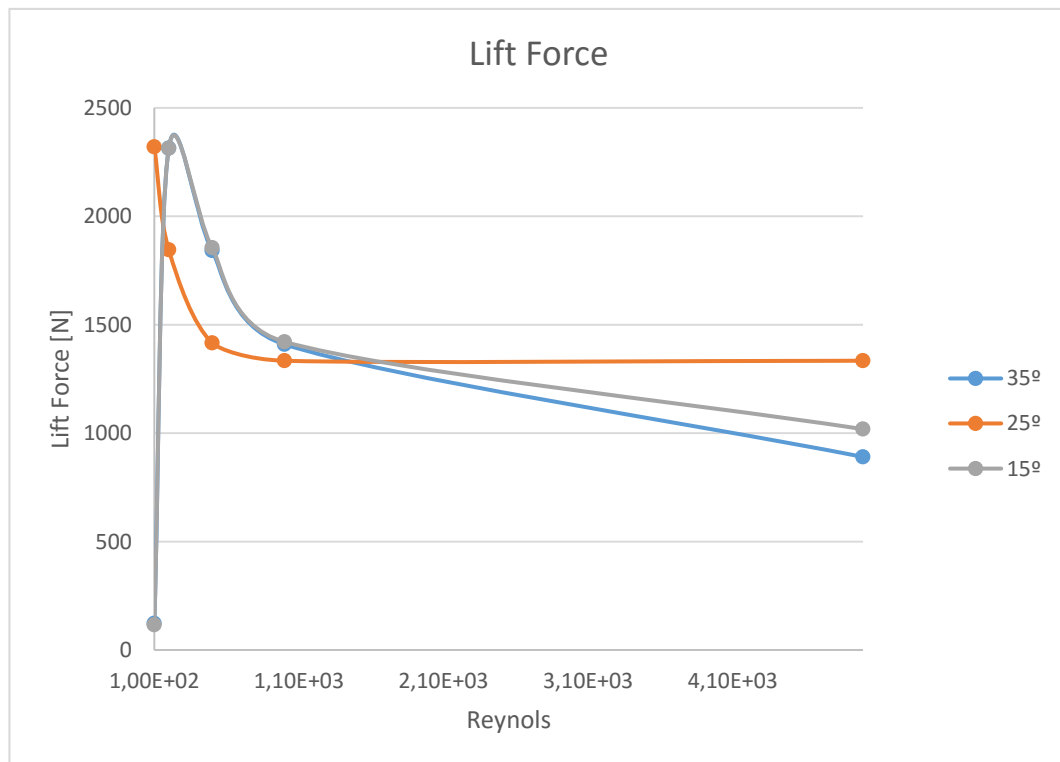


Figura 5.12: Detalle de la fuerza de sustentación para régimen laminar

El ángulo de 15° por ser el perfil más plano y con mayor recorrido de la capa límite sin desprenderse, produce mayor sustentación que los demás. Mientras que el ángulo de 35° y 25° se encuentra en valores muy próximos.

6. Conclusiones

La realización de este estudio ha reportado una cantidad de conocimientos muy grande en lo que respecta a la técnica CFD. La complejidad de aplicación de dichas técnicas ha requerido de muchas horas de estudio previo antes de ejecutar las primeras simulaciones. OpenFOAM es un paquete extremadamente complicado de herramientas, especialmente cuando se parte de un total desconocimiento en informática, Linux y las técnicas CFD. Por otro lado, tras las primeras simulaciones se adquirió experiencia y una mejor comprensión de cómo se comporta un fluido al pasar a través de un obstáculo, como puede ser un vehículo. También se ha asentado la teoría referente a flujo externo de la mecánica de fluidos y se ha ahondado en su modelización. Se han adquirido conocimientos sobre modelos de turbulencia existentes para las ecuaciones gobernantes y sus algoritmos de resolución (como SIMPLE o PISO). De forma menos profunda se ha comprendido la importancia de los métodos de discretización como el de los volúmenes finitos y de sus limitaciones a la hora de llegar a resultados con sentido tras posibilitar la convergencia éstos.

En lo referente a los resultados de la simulación se ha podido dilucidar que para mayores Reynolds la resistencia crece cuadráticamente y que el ángulo de salida del flujo repercute notablemente en la depresión generada en la estela. Es decir, con este estudio por un lado hemos comprendido la evolución de las fuerzas a medida que se incrementaba el número de Reynolds y por otro lado la influencia en dichas fuerzas que tiene el ángulo de inclinación en la salida de fluido

El parámetro fundamental que establece el comportamiento de un fluido es el Reynolds y por tanto en pro de la convergencia numérica, para Reynolds bajos se ha tenido que aumentar la viscosidad cinemática manteniendo velocidades constantes en cada caso laminar para así poder obtener resultados.

El parámetro de calidad de la capa límite es el Y^+ y gracias a los valores obtenidos se ha podido modelar con buena fiabilidad los esfuerzos cortantes y las fuerzas de rozamiento derivadas. La reformulación RANS escogida, junto con el modelo de turbulencia $k\Omega$ SST, ha contribuido a la obtención de dichos resultados ahorrando el coste computacional de tener que ir a modelos DES o LES.

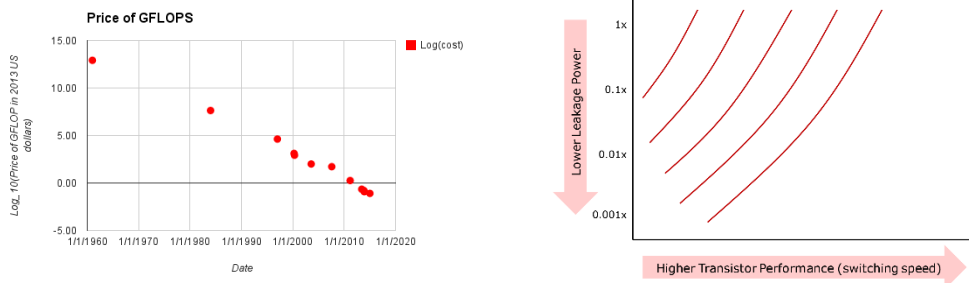
7. Impacto Ambiental

El impacto ambiental más relevante a considerar es el de la emisión de gases de efecto invernadero o CO₂ equivalente derivado del uso de energía de cualquier actividad que sea necesaria para realizar este estudio.

1.20 Escenario actual

Se entiende este proyecto como, por ejemplo, parte de una línea de investigación y desarrollo de un fabricante de automoción para la implementación de mejoras aerodinámicas. El estudio de un fenómeno aerodinámico mediante el uso de técnicas CFD tiene un impacto directo en el coste energético si lo comparamos con el uso de túneles de viento, su mantenimiento, así como del uso de los recursos humanos necesarios a movilizar para realizar experimentación física.

Todo ello es posible gracias al abaratamiento de los procesadores actuales y, a su vez, un incremento del rendimiento de computación por unidad vatio de potencia con cada nueva generación.



Se puede decir que estamos en el mejor escenario para el desarrollo y la mejora de la competitividad de las técnicas CFD para una implementación cada vez mayor en la industria.

1.21 Gases emitidos

La energía gastada que hemos podido cuantificar es la referente al transporte hacia el puesto de trabajo y las horas de computación:

Actividad	Cantidad	Consumo	total	Factor de emisión	Total emitido
Computación	900 horas	0,4 kW	360kWh	0,649 kgCO ₂ /kWh	233,64 kg CO ₂
Transporte	88 días	60 km /día	5280 km	177g CO ₂ / km	934,56 kg CO ₂

1.22 Ahorro del impacto futuro

.

Como se comenta en el apartado 1.2 Justificación, se consiguen mejoras de la resistencia aerodinámica muy notables en los coches actuales, gracias a estudios científicos realizados. Por tanto, cualquier línea de investigación para aumentar la eficiencia debe ser considerada ambientalmente como un impacto transitorio en pro de la mejora futura en la eficiencia del transporte.

Es incontable la cantidad de kg de CO₂ ahorrados durante la emisión de gases por el transporte de personas gracias a las mejoras en la aerodinámica actual de los vehículos, que posibilitan un ahorro de combustible mayor.

8. Presupuesto

El presupuesto calculado para este proyecto se incluye en el documento “BUDGET”, que se entrega junto a la memoria.

Tras el desglose de la repercusión económica de las fases del proyecto se ha concluido que el coste total será de 5944,8 €.

9. Trabajos futuros

Existen varias líneas futuras de mejora para la continuación de este trabajo y poder implantar mejoras en la aerodinámica.

Para la mejora la fiabilidad de la simulación:

- Aplicación de otros modelos de turbulencia y comparación de resultados
- Aplicación de modelos LES, DES o incluso DNS

Para la ampliación y aplicabilidad real del resultado:

- Implementar un modelo de malla 3D de calidad
- Estudiar los modos de frecuencias de la turbulencia para diferentes geometría o Reynolds con el fin de extraer patrones para aplicar en técnicas de Active Flow Control

Para el estudio de la reducción de las fuerzas resistentes:

- Modificar la forma superficial del Ahmed con la inclusión dispositivos superficiales pasivos como flaps, slats, difusores, generadores de vortex o extensiones, entre otros.
- Aplicar Active Flow Control (control activo de flujo) en diferentes zonas donde se produce desprendimiento de capa límite y generación de turbulencias.

10. Bibliografía

- [1] J. M. Bergada, Mecánica de Fluidos. Breve introducción teórica con problemas resueltos, Terrassa, Spain: Edicions UPC, 2012.
- [2] C. J. Greenshields, OpenFOAM. The Open Source CFD Toolbox. User Guide, OpenFOAM Funation Ltd., 2015.
- [3] S. R. Ahmed y G. Ramm, «Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake,» *SAE The Engineering Resource For Advancing Mobility*, p. 32, 1984.
- [4] Ltd, OpenCFD, OpenFOAM. The open source CFD Toolbox. Advanced Training., OpenCFD Ltd, 2009.
- [5] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, An Introduction to COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS. The Finite Volume Method, 2 ed., London: Pearson, 2007, p. 495.
- [6] T. Maric, J. Höpken and K. Mooney, The OpenFOAM Technology Primer, Soruceflux, 2014.